



**Universidade de
Aveiro
2014**

Departamento de Engenharia Civil

**ANA CATARINA
MINISTRO LOURENÇO**

**DESENVOLVIMENTO DE ARGAMASSAS DE COLAGEM
COM TEOR DE CIMENTO REDUZIDO**



**Universidade de
Aveiro
2014**

Departamento de Engenharia Civil

**ANA CATARINA
MINISTRO LOURENÇO**

**DESENVOLVIMENTO DE ARGAMASSAS DE COLAGEM
COM TEOR DE CIMENTO REDUZIDO**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, realizado sob a orientação científica do Doutor Victor Miguel Carneiro de Sousa Ferreira, Professor associado do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro e co -orientação do Doutor Luís Miguel Cardoso da Silva, especialista na área das argamassas e Diretor de Marketing da empresa Saint-Gobain Weber Portugal.

À minha avó Julinha

o júri

Presidente

Professor Doutor Paulo Barreto Cachim

Professor associado do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

Doutora Helena Maria da Costa Paiva

Investigadora CICECO, Universidade de Aveiro

Prof. Doutor Vítor Miguel Carneiro de Sousa Ferreira

Professor associado do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

Agradecimentos

Agradeço ao Professor Victor Ferreira, orientador desta dissertação, pelo encaminhamento, disponibilidade e ensinamentos prestados.

À empresa Saint-Gobain Weber por todo o acolhimento, pelo carinho e por ter garantido as condições para realizar a minha dissertação.

Ao Doutor Luís Silva pela disponibilidade, dedicação e por todos os ensinamentos e conhecimentos transmitidos.

À Vera Fernandes, Pedro Sequeira, Hélder Gonçalves, Bruno Lobo, Cátia Pinho, Nuno Vieira e Rui Reis, pela amizade, carinho e por toda a boa disposição. Vou sentir muitas saudades.

Às minhas amigas Cátia Alves, Patrícia Figueiredo, Lúcia Dionísio e Mariana Ferreira pela amizade, paciência e apoio demonstradas ao longo de todo o percurso.

Aos meus amigos Samuel Carvalho, José Miguel Silva, Eurico Correia e António Diogo por me terem acompanhado sempre.

Por último o maior agradecimento é para os meus pais, Joaquina e José, e irmãos, Pedro e João, pelo apoio, palavras de incentivo e compreensão.

Palavras – chave

Cimento cola, Escória de alto-forno, Emissões de CO₂, tensão de aderência, deformação transversal.

Resumo

O presente trabalho decorre da importância crescente da adoção de um pensamento ecológico no que diz respeito à indústria da construção, sendo um dos setores mais ativos no consumo de matérias-primas de elevadas quantidades de energia, gerando muitos resíduos (construção e demolição). O cimento Portland é um dos materiais mais utilizados na indústria da construção e associado ao seu fabrico estão as elevadas emissões de CO₂. Na tentativa de redução dessas emissões tem-se vindo a estudar várias alternativas para a indústria do cimento.

Neste estudo foi investigado o uso da adição da escória de alto – forno em argamassas – cola do tipo C1 e C2, em substituição do cimento Portland.

Procedeu-se à caracterização química da escória de alto – forno (granulometria, difração de raios X, análises térmicas, distribuição de tamanho da partícula, método de BET e avaliação da reatividade pozolânica) e avaliação/caracterização da substituição parcial de cimento Portland e cimentos – cola adotando a norma EN12004 e respetivos ensaios.

Os resultados alcançados permitem concluir que as principais propriedades físicas não são afetadas, para adições até 25% do resíduo, aos cimentos. Por outro lado, substituições superiores implicam trabalhos adicionais de ajustamento de formulações para manter um comportamento das argamassas aceitável ao nível o seu caderno de especificações.

keywords

Cimentitious adhesives, slag, CO₂ emissions adhesion strength, transversal deformation

abstract

This study results from the importance of increasing adoption of ecological thinking with regard to the construction industry. Being one of the most active sectors, which consumes more raw materials and high amounts of energy, creating a lot of wastes (construction and demolition).

Portland cement is one of the most widely used materials in the construction industry and their manufacture is associated to elevated CO₂ emissions. In the attempt to reduce greenhouse gas emissions has been study several alternatives for the cement industry.

It was investigated the addition of blast furnace slag in C1 and C2 kind of mortar to replace Portland cement.

It was made the chemical characterization of blast furnace slag (grain size, x-ray, thermal analysis, the particle size distribution, BET method and evaluation of the pozzolanic reactivity) and evaluation /characterization of a partial replacement of Portland cement in cimentitious tile adhesives, adopting EN 12004 standard and related test methods.

The results obtained allow to conclude that the main physical properties are not affected, for additions up to 25% of the residue to cement.

On the other hand, higher substitutions requires additional work formulations adjustment to maintain an acceptable behavior of the mortar at their specification level.

Índice

Índice	i
Índice de figuras	iii
Índice de tabelas	v
1. Introdução.....	1
1.1 Enquadramento.....	1
1.2 Metodologia.....	3
1.3 Objetivo	4
2. Reabilitação de suportes antigos	5
2.1 Enquadramento.....	5
2.2 Exigências funcionais	5
3. Resíduos industriais na indústria do cimento	7
3.1 Aspetos gerais sobre a reciclagem de resíduos.....	7
3.2 Sustentabilidade na construção – Emissões de CO ₂ vs Utilização de cimento.....	8
3.3 Matérias-primas alternativas na indústria cimenteira.....	9
3.3.1 Escórias de alto-forno.....	10
3.3.2 Cinzas volantes.....	11
3.3.3 Metacaulino.....	12
4. Fabrico e aplicação de argamassas	13
4.1 Generalidades	13
4.1.1 Definição de argamassa	13
4.1.2 Classificação das argamassas:	14
4.1.3 Funções das argamassas:	14
4.2 Elementos de fixação – cimento cola	14
4.2.1 Definição e caracterização dos seus constituintes.....	14
4.2.2 Enquadramento normativo	20
4.2.3 Propriedades dos cimentos cola	22

5. Procedimento experimental.....	25
5.1. Desenvolvimento e preparação das formulações.....	25
5.2. Ensaio de caracterização	26
5.2.1. Caracterização das matérias-primas	26
5.2.2. Caracterização dos produtos em pó	32
5.2.3. Caracterização dos produtos em pasta.....	33
5.2.4. Caracterização dos produtos endurecidos.....	39
6. Apresentação e discussão dos resultados	47
6.1. Caracterização das escórias de alto-forno	47
6.1.1. Ensaio de caracterização	47
6.1.2. Ensaio de reatividade	51
6.2. Avaliação do impacto na substituição parcial de cimento Portland por escória de alto-forno	54
6.2.1. Substituição em cimento-cola do tipo C1.....	54
6.2.2. Substituição em cimento do tipo C2.....	58
6.3. Desenvolvimento de formulações com Escória de alto-forno como ligante principal.....	63
6.3.1. Formulações do tipo C1.....	63
6.3.2. Formulações do tipo C2.....	66
7. Conclusões e Propostas de trabalhos futuros	69
8. Referências Bibliográficas	73
ANEXOS	81

Índice de figuras

Figura 1 – Peso da reabilitação na produção total da construção (AECOPS,2009)	5
Figura 2 – Diagrama com a composição genérica das argamassas	15
Figura 3 – Equipamentos para análise granulométrica.....	26
Figura 4 – Modelo esquemático da adsorção física de moléculas de gás sobre a superfície de um sólido (fonte: <i>commons.wikimedia.org</i>).....	28
Figura 5 – Esquema explicativo do funcionamento da Difração Laser (fonte: <i>innopharmalabs.com</i>)	29
Figura 6 – Equipamentos para amassadura	30
Figura 7 – Molde metálico	30
Figura 8 – Provetes para ensaio de pozolanicidade	31
Figura 9 – Equipamento ensaio flexão e compressão.....	31
Figura 10 – Equipamento de determinação da massa volúmica aparente do produto em pó	32
Figura 11 – Equipamentos para determinação da água d amassado.....	33
Figura 12 – Equipamento de determinação da massa volúmica aparente do produto em pasta.....	34
Figura 13 – Equipamentos determinação tempo de presa	35
Figura 14 – Equipamentos determinação da retenção de água.....	36
Figura 15 – Equipamentos e procedimento poder molhante (parte 1)	37
Figura 16 - Equipamentos e procedimento poder molhante (parte 2)	37
Figura 17 – Equipamentos e procedimento deslizamento	38
Figura 18 – Equipamentos e procedimento deslizamento	39
Figura 19 – Equipamentos e esquema representativo do procedimento	40
Figura 20 – (1-Acessório de tração; 2- Ladrilho; 3 – Argamassa cola; 4 – Suporte) Tipos de rotura.....	42
Figura 21 – Equipamento e esquema de procedimento de preparação do ensaio	43
Figura 22 – Equipamento e esquema de ensaio.....	44
Figura 23 – Difractogramas de raios X	48
Figura 24 – Análise térmica diferencial e gravimétrica	49
Figura 25 – Distribuição do tamanho de partícula das escórias	50
Figura 26 – Resultados de resistência à flexão com e sem base forte para diferentes condições de cura	52

Figura 27 – Resultados de resistência à compressão com e sem base forte para diferentes condições de cura	53
Figura 28 – Tensões de aderência para as várias condições em avaliação	55
Figura 29 - Tensões de aderência para as várias condições em avaliação	56
Figura 30 – Aspeto após imersão em água	56
Figura 31 – Resultados da deformação transversal	57
Figura 32 – Tensões de aderência para as várias condições estudadas	60
Figura 33 - Tensões de aderência para as várias condições estudadas	61
Figura 34 – Aspeto das argamassas após imersão	62
Figura 35 - Resultados da deformação transversal	62
Figura 36 - Tensões de aderência para as várias condições em estudo	64
Figura 37 – Roturas C1.01 a) e b)	65
Figura 38 – Roturas C1.01 c)	65
Figura 39 - Tensões de aderência para as várias condições em estudo	67

Índice de tabelas

Tabela 1 – Classes de colas segundo a en 12004.....	21
Tabela 2.a) - Especificações para cimentos cola – caraterísticas fundamentais (en 12004).....	21
Tabela 3 - Especificações para cimentos cola – características opcionais (en 12004)	22
Tabela 4 – Descrição das várias argamassas estudadas e respetiva designação	26
Tabela 5 – Análise granulométrica.....	47
Tabela 6 – Valores de área superficial especifica.....	48
Tabela 7 – Resultados dos produtos em pasta com e sem base forte.....	51
Tabela 8 – Formulações com diferentes percentagens de cimento e introdução de escória de alto -forno.....	54
Tabela 9 - Resultados dos produtos em pasta de argamassas com diferentes percentagens de cimento e introdução de escória de alto - forno.....	55
Tabela 10 – Apresentação dos parâmetros força (n) e deformação (mm) obtidos a partir do ensaio de deformação transversal	57
Tabela 11 - Formulações com diferentes percentagens de cimento e introdução de escória de alto -forno.....	58
Tabela 12 - Resultados dos produtos em pasta de argamassas com diferentes percentagens de cimento e introdução de escória de alto - forno.....	59
Tabela 13 – Resultados para redução da % de éter de celulose (0.30%).....	59
Tabela 14 – Resultados cfl.03 com 0.3% de éter de celulose	60
Tabela 15 - Apresentação dos parâmetros força (n) e deformação (mm) obtidos a partir do ensaio de deformação transversal	62
Tabela 16- Formulações com diferentes percentagens de cimento e introdução de escória de alto -forno.....	63
Tabela 17 - Resultados dos produtos em pasta de argamassas com diferentes percentagens de escória de alto - forno	64
Tabela 18 - Formulações com diferentes percentagens de cimento e introdução de escória de alto -forno.....	66
Tabela 19 - Resultados dos produtos em pasta de argamassas com diferentes percentagens de escória de alto - forno	67
Tabela 20 - Resultados de resistência à flexão e compressão sem base forte para diferentes condições de cura	81
Tabela 21 - Resultados de resistência à flexão e compressão com base forte para diferentes condições de cura	82
Tabela 22 - Formulações com diferentes percentagens de cimento e introdução de escória de alto -forno.....	83
Tabela 23 - Resultados dos produtos em pasta de argamassas com diferentes percentagens de cimento e introdução de escória de alto - forno.....	84
Tabela 24 - Tensões de aderência para as várias condições em avaliação.....	85
Tabela 25 - Formulações com diferentes percentagens de cimento e introdução de escória de alto -forno.....	86
Tabela 26 - Resultados dos produtos em pasta de argamassas com diferentes percentagens de cimento e introdução de escória de alto - forno.....	87
Tabela 27 - Tensões de aderência para as várias condições em avaliação.....	88
Tabela 28 - Formulações com diferentes percentagens de cimento e introdução de escória de alto -forno.....	89

Tabela 29 - Resultados dos produtos em pasta de argamassas com diferentes percentagens de cimento e introdução de escória de alto - forno.....	90
Tabela 30 - Tensões de aderência para as várias condições em avaliação.....	91
Tabela 31 - Formulações com diferentes percentagens de cimento e introdução de escória de alto -forno	92
Tabela 32 - Resultados dos produtos em pasta de argamassas com diferentes percentagens de cimento e introdução de escória de alto - forno.....	92
Tabela 33 - Tensões de aderência para as várias condições em avaliação.....	93
Tabela 34 - Formulações com diferentes percentagens de cimento e introdução de escória de alto -forno	94
Tabela 35 - Resultados dos produtos em pasta de argamassas com diferentes percentagens de cimento e introdução de escória de alto - forno.....	95
Tabela 36 - Tensões de aderência para as várias condições em avaliação.....	96

1. Introdução

1.1 Enquadramento

Desde o início dos tempos, o Homem tentou sempre adaptar-se ao meio em que vivia, satisfazendo as necessidades mais rudimentares. Com a necessidade de se proteger da agressividade do meio ambiente (condições climáticas, outros predadores...) era nómada. O tempo de permanência em cada local dependia da abundância de alimentos e do clima. Com a descoberta e com o aperfeiçoar da utilização do fogo, o Homem começou o processo de sedentarização. Começou a construir cabanas utilizando varas de madeira e as peles de animais que serviam para sua alimentação. Com o domínio da agricultura procurou fixar-se nas zonas onde os terrenos eram mais férteis e viver em grupos de “famílias nucleares”.

Acredita-se que terá começado a civilização na Mesopotâmia, havendo a necessidade de se contruir abrigos mais seguros, robustos e que durassem mais tempo, evoluiu-se para a utilização de alvenarias de blocos de terra amassados e para a construção em alvenaria seca de pedra, sem utilização de materiais aglutinantes. A construção foi assim evoluindo através da utilização e domínio de novos materiais como a pedra, a madeira, e mais tarde o ferro.

Depois de construções como os dólmens, alinhamentos megalíticos, as pirâmides do Egipto e a magnífica Muralha China, a construção passa a ser vista como arte e forma de afirmação entre as nações.

No final do século XIX surge o betão. Acreditava-se que seria a solução para os problemas de resistência, durabilidade e economia, sendo as suas primeiras aplicações datadas de 1880 em trabalhos que nada tinham a ver com edificação. Foi mais tarde utilizado na construção de paredes maciças em taipa e sem armadura. Com o passar dos anos o Homem foi aperfeiçoando as suas características e começando a incorporar aço para corrigir o comportamento mecânico à tração. Atingiu-se desta maneira o esquema da habitação comum nos dias de hoje.

Aumenta assim as exigências ao nível da resistência das construções, com processos de transformação das matérias-primas a incorporar nos materiais de construção, mais complexos e não apenas a sua extração, o que implicou um maior consumo

energético e maior dificuldade na devolução ao ecossistema após o fim da vida útil das construções.

O Centro Regional de Informação das Nações Unidas expõe de uma forma sintetizada a edição de 2014 do relatório da ONU “Perspetivas da Urbanização Mundial” produzida pela Divisão das Nações Unidas para a População do Departamento dos Assuntos Económicos e Sociais (DESA). O relatório conclui que hoje, 54% da população mundial vive em áreas urbanas, uma proporção que se espera que venha a aumentar para 66% em 2050. As projeções mostram que a urbanização associada ao crescimento da população mundial poderá trazer mais 2,5 mil milhões de pessoas para as populações urbanizadas em 2050, com quase 90% de crescimento centrado na Ásia e África. A nível mundial a população urbana tem crescido velozmente passando de 746 milhões em 1950 para 3,9 mil milhões em 2014. Mega – Cidades com mais de 10 milhões de habitantes estão a crescer em número. O relatório refere que em 1990, havia 10 Mega - cidades com 10 milhões de habitantes ou mais. Em 2014 existem 28 Mega – Cidades no mundo que traduzem 12 % de habitantes a nível mundial. Atualmente, das 28 mega – cidades, 16 estão localizadas na Ásia, 4 na América Latina, 3 na África e na Europa, e duas na América do Norte. Espera-se desta maneira que em 2030 existam 41 mega – cidades.

Organizações como a ONU e World Wide Fund for Nature, lançam periodicamente, relatórios baseados em estudos aprofundados sobre o planeta terra. O crescimento populacional e a sua influência na utilização de recursos naturais têm sido temas bastante explorados. Desde os anos 70 que estas organizações têm vindo a alertar para esta problemática avançando ainda com uma data para o fim , uma vez que é neste momento preocupante a velocidade a que estes se estão a esgotar. Numa tentativa proativa de comunicar o problema têm lançado em cada edição as pegadas ecológicas de cada país em cada continente. A união Europeia dentro da comunidade apresenta também os seus resultados e Portugal encontra-se na 27º posição do ranking de emissões de CO₂ segundo o resumo do WWF – Relatório Planeta Vivo 2014 avançado pelo www.WWF.pt.

Com as projeções avançadas pelo relatório da ONU para o crescimento populacional mundial, é fulcral que se estudem alternativas sustentáveis para os materiais que se têm vindo a utilizar na construção.

Em Portugal, o cimento é o material de construção mais utilizado. Na vertente económica, o consumo energético despendido no seu fabrico é uma preocupação, pois a

elevada quantidade de recursos naturais exigidos por esta tecnologia é dificilmente conciliável com a menor disponibilidade de recursos existentes na Natureza.

Com o emergir das preocupações ambientais no início dos anos 70, a ciência e o progresso tecnológico começaram a considerar essencial o bem-estar e a sobrevivência humana em harmonia com a natureza. Começou o despertar da consciência social acerca da fragilidade do Planeta e o “pensamento ecológico” começou a ser implementado, inclusive ao nível da construção. Numa primeira abordagem considerou-se a energia despendida na fase de utilização de um edifício, e posteriormente, também a energia necessária no fabrico dos materiais utilizados, pois a indústria de construção tem um crescimento a um ritmo que não é compatível com a capacidade de auto regeneração dos recursos utilizados (Mateus, 2004).

Neste trabalho será abordado a temática da sustentabilidade da construção relativamente às argamassas de fixação (colagem) de elementos cerâmicos, especialmente em contexto de reabilitação, de modo a cumprir os requisitos normativos, mas permitindo reduzir os seus impactos enquanto material de construção. Focar-se-á numa estratégia de redução do teor de cimento Portland (OPC - Ordinary Portland Cement) nas argamassas de colagem, no sentido de minimização dos impactes ambientais globais, uma vez que é este material o que apresenta maior contributo na caracterização de sustentabilidade de uma argamassa.

1.2 Metodologia

O desenvolvimento desta dissertação compreende a realização de um estágio na empresa Saint - Gobain Weber. Por forma a atingir os objetivos propostos nesta dissertação, serão avaliadas formulações, a partir de argamassas do fabricante.

Os materiais deverão ser compatíveis com sistemas antigos, em contexto de reabilitação. Será desenvolvida uma argamassa-cola para fixação de ladrilhos cerâmicos capaz de cumprir os requisitos da norma EN 12004. Desta forma, o presente trabalho centrar-se-á, num estudo experimental de modo a avaliar os parâmetros inerentes à reabilitação de revestimentos cerâmicos usando argamassas-cola compatíveis.

Todo este processo envolve um conjunto de etapas de modo a concretizar os objetivos propostos, sendo as seguintes:

Etapas 1. – Pesquisa e Estado de arte.

Etapas 2. – Avaliar os principais requisitos funcionais a cumprir pela argamassa - cola.

Etapas 3. – Desenvolvimento de formulações de argamassa cola com redução de OPC através de matérias - primas alternativas.

Etapas 4. – Avaliação do impacto das novas formulações, nas propriedades em fresco e no estado endurecido.

Etapas 5. – Avaliação do desempenho como argamassa-cola das formulações desenvolvidas.

Etapas 6. – Conclusões e elaboração da dissertação.

1.3 Objetivo

Pretende-se com este trabalho desenvolver uma argamassa-cola para fixar revestimentos cerâmicos em reabilitação de edifícios antigos, com substituição parcial de cimento Portland por escória de alto-forno (GGBFS – Ground Granulated Blast Furnace Slag) com o intuito de minimizar os impactes ambientais deste material de construção. A argamassa a desenvolver deverá, contudo, cumprir os requisitos para colas de fixação de cerâmicos exigidos pela Norma Europeia EN 12004.

2. Reabilitação de suportes antigos

2.1 Enquadramento

A preservação do património edificado Português é impreterível devido à importância que este assume no contexto da identidade de um país com oito séculos de história, mas também por motivos económicos ligados ao subsector Turismo (Torgal e Jalali, 2010).

Considerando o mercado da construção nova saturado, a reabilitação urbana é vista como um modelo a adotar para o futuro, embora haja muito trabalho por realizar como se pode verificar na **Figura 1**. Portugal encontra-se na cauda da tabela dos países da União Europeia no que diz respeito ao peso da reabilitação na construção. ((AECOPS, 2009); Afonso, 2001).

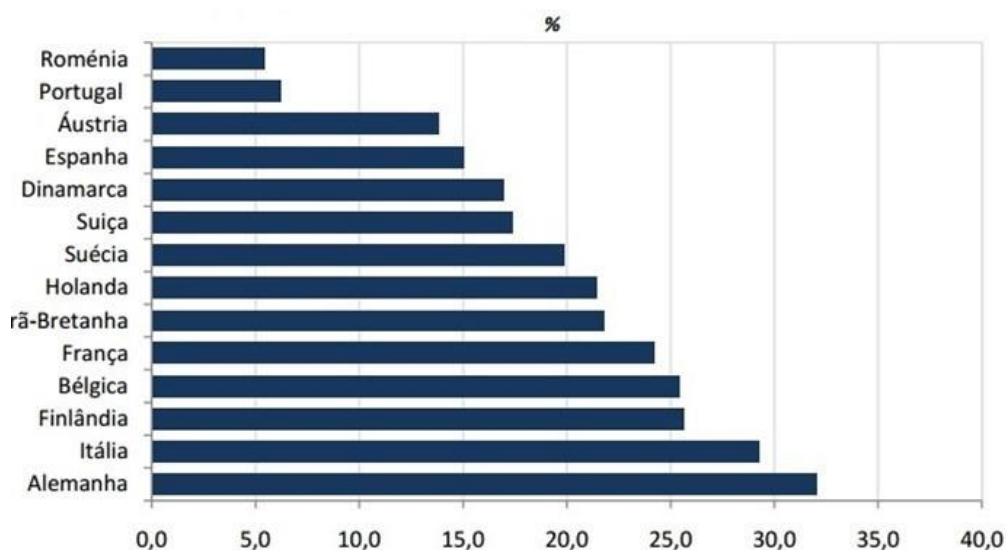


Figura 1 – Peso da reabilitação na produção total da construção (AECOPS,2009)

2.2 Exigências funcionais

No contexto da reabilitação do património edificado, o aparecimento do cimento Portland propiciou o abandono das argamassas tradicionais à base de cal aérea, por se constituir como um ligante capaz de conferir às argamassas resistências mecânicas mais elevadas e pelo baixo tempo de presa, o que permitia a realização dos trabalhos em prazos relativamente mais curtos (Faria et al., 2011)

Contudo, as argamassas contendo como ligante principal o cimento Portland não constituem a solução mais adequada para as intervenções de reabilitação, devido aos inconvenientes que lhe estão normalmente associadas, nomeadamente o elevado módulo de elasticidade, que se traduz na incapacidade de acomodar deformações dos suportes, na baixa permeabilidade ao vapor de água e pela introdução de sais solúveis, para além da incompatibilidade química com as argamassas à base de cal. (Coelho et al., 2009)

De facto, as argamassas destinadas à conservação de edifícios antigos têm de verificar uma série de exigências adicionais relacionadas com a ética da conservação do património edificado e que devem permitir o cumprimento de vários critérios, dos quais se salientam os seguintes (Veiga et al, (2004); Veiga e Carvalho, (2002); Veiga, (2005); Magalhães e Veiga, (2005)) com particular orientação ao nível de colagem de ladrilhos (argamassa – cola).

- Não contribuir para degradar os elementos pré-existentes, nomeadamente as alvenarias antigas;
- Ser reversíveis ou pelo menos reparáveis;
- Ser duráveis e contribuir para a durabilidade do conjunto;

Para o cumprimento destes requisitos, na sua essência, as argamassas têm de apresentar:

- Aderência ao suporte para garantir a durabilidade mas não excessiva a ponto da sua extração poder afetar a alvenaria;
- Não introduzir sais solúveis ao suporte;
- Módulo de elasticidade baixo e que garante compatibilidade entre materiais;
- Bom comportamento ao gelo e aos sais solúveis existentes no suporte.
- Ter alguma resistência mecânica mas não transmitir tensões elevadas ao suporte. Por exemplo, a resistência mecânica dos revestimentos deve ser inferior à dos suportes sobre os quais se prevê que possam vir a ser aplicados;

Sendo este Último requisito um verdadeiro desafio para as argamassas – cola porque, por outro lado é necessário garantir a colagem de ladrilhos.

3. Resíduos industriais na indústria do cimento

3.1 Aspetos gerais sobre a reciclagem de resíduos

A indústria da construção constitui um dos maiores e mais ativos sectores em toda a Europa. Esta atividade consome mais matérias-primas do que qualquer outra atividade económica, consome também elevadas quantidades de energia e os resíduos de construção e demolição. Representa a grande maioria dos resíduos produzidos em toda a Europa, sendo que grande parte desses resíduos tem a vantagem de poder ser reciclada. Materiais produzidos a partir de resíduos, com elevado nível de reciclagem, mais duráveis, que incorporem menos energia ou que sejam escolhidos mediante uma análise do seu ciclo de vida, constituem soluções inequívocas de contributos para uma construção sustentável (Torgal e Jalali, 2007).

O processo de reciclagem de materiais garante, no mínimo, a diminuição da quantidade de resíduos lançados no meio ambiente, o que já é uma grande vantagem em termos de preservação, além de contribuir para a minimização da utilização dos recursos naturais não renováveis. Em casos específicos, a reciclagem pode ser mais económica que a utilização de matérias-primas virgens (Rezende, 2004).

O correto transporte, tratamento e disposição final de um resíduo são ações que apresentam um custo que, em alguns casos, pode ser bastante elevado. Assim, se for encontrada uma forma de reaproveitar ou vender esses resíduos, criar-se uma maneira bastante apazível de resolver o problema e ainda conseguir uma fonte de renda adicional (Rocca et al., 1993).

Em termos práticos, a reciclagem por recuperação de um resíduo, depende dos seguintes fatores:

- Proximidade da instalação de reprocessamento;
- Custo do transporte de resíduos;
- Volume de resíduos disponíveis para o reprocessamento;
- Custos de armazenamento do resíduo, no ponto onde se gera ou fora do local de origem.

Na construção civil reciclar pode gerar inúmeros benefícios, tais como:

- Redução no consumo de recursos naturais não-renováveis, quando substituídos por resíduos reciclados (John, 2000).
- Redução de áreas necessárias para aterro, pela minimização de volume de resíduos pela reciclagem. Destaca-se aqui a necessidade da própria reciclagem dos resíduos de construção e demolição, que representam mais de 50% da massa dos resíduos sólidos urbanos (Pinto, 1999).
- Redução do consumo de energia durante o processo de produção. Destaca-se a indústria do cimento, que usa resíduos com poder calorífico para a obtenção de sua matéria-prima (coincineração) ou utilizando a escória de alto-forno, resíduo com composição semelhante ao cimento (John, 2000).
- Redução da poluição, em que temos como exemplo a indústria de cimento, que reduz a emissão de dióxido de carbono, utilizando escória de alto-forno em substituição ao cimento Portland (John, 1999).

A reciclagem de resíduos, assim como qualquer atividade humana, também pode causar impactos ao meio ambiente. Dependendo do tipo de resíduo, a tecnologia aplicada e a utilização proposta para o material reciclado, esta pode tornar-se ainda mais prejudicial do que o próprio resíduo o era antes de ser reciclado. Dessa forma, o processo de reciclagem promove riscos ambientais que precisam ser adequadamente geridos (Ângulo, Zordan e John, 2000).

3.2 Sustentabilidade na construção – Emissões de CO₂ vs Utilização de cimento

A indústria de cimento está a tentar responder rapidamente à necessidade social para a redução das emissões de CO₂, através do aumento da produção de cimentos Portland misturados com cimento suplementar. Materiais que são principalmente derivados de subprodutos industriais, tais como escórias de alto-forno e as cinzas volantes da combustão de carvão.

De acordo com World Business Council on Sustainable Development os três pilares do desenvolvimento sustentável são o crescimento económico, equilíbrio ecológico e progresso social, e não se pode ter um sem qualquer um dos outros. Assim quando se pensa nas formas de reduzir as emissões de CO₂, relacionadas com o fabrico do cimento, deve considerar-se não só processo de fabrico mas também onde e como encontrar os recursos das restantes matérias-primas e qual o seu impacto global. O betão constitui o produto principal, com base de cimento Portland, a nível mundial. As estimativas mundiais apontam para 1,7x 10⁹ ton/ano suficiente para produzir mais de 6 km³ de betão por ano ou pelo menos 1 m³ por pessoa. Para a produção de 1 m³ de betão, a média de emissões de CO₂ é cerca de 0,2 toneladas o que perfaz cerca de 0.08 toneladas de CO₂ por tonelada de betão. Ainda assim pode indicar-se que estes valores são baixos quando comparados, por exemplo, com os valores de CO₂ emitidos na produção de aço (Gartner, 2004; Price, Worrel e Phylipsen, 1999).

3.3 Matérias-primas alternativas na indústria cimenteira

Há décadas que a indústria de cimento tem sido utilizada como um veículo, economicamente viável, para a destinação de alguns tipos de resíduos inorgânicos. A escória de alto-forno e cinzas volantes, por exemplo, substituem parte da matéria-prima do processo, transformando o que era considerado um resíduo, ou seja, um subproduto perigoso e incómodo, num produto comercial. Em muitos casos, esses materiais têm sido analisados como fontes alternativas de matéria-prima, como é o caso de escórias de ferro-ligas e microsílica (Rezende, 2004).

De acordo com alguns investigadores, a forma mais eficiente para a indústria da construção se tornar uma atividade sustentável, passa pela incorporação de resíduos de outras indústrias em materiais de construção. Considerando o betão como o material mais utilizado na indústria da construção a nível mundial (2000 Mt/ano), existe um corpo de investigação bastante consistente em termos da utilização de resíduos em betões. Materiais com características pozolânicas, cinzas volantes, escórias de alto-forno, sílica de fumo, cinzas de resíduos vegetais, cinzas de resíduos sólidos urbanos, resíduos de vidro (Torgal e Jalali, 2007).

A incorporação de materiais reciclados na indústria cimenteira tem sido há vários anos, objeto de estudo. Conseguir um material ligante com características resistentes e

duráveis é o grande desafio. Quanto maior a durabilidade de um material maior será a sua vida útil e, conseqüentemente, menor será o seu impacto ambiental. Se, por exemplo, aumentar a durabilidade do betão de 50 para 500 anos, haverá uma redução do seu impacto ambiental de um fator de 10 vezes (Mora,2007).

O cimento Portland, por apresentar uma elevada quantidade de cal, é atacado quimicamente com facilidade. Em adição, a incapacidade do mesmo garantir uma boa aderência aos agregados, conduz a níveis de permeabilidade elevados, facilitando a absorção de água, gases e substâncias agressivas, que provocam fenómenos de carbonatação e corrosão das armaduras. Por isso, a utilização de ligantes alternativos ao cimento Portland, como por exemplo os ligantes ativados alcalinamente, pode constituir um passo na sustentabilidade da construção (Torgal e Jalali, 2007). Materiais ricos em sílica e/ou alumina reativas, e com granulometria fina, podem ser utilizados, em geral, como pozolanas em argamassas e betões. Esses materiais podem contribuir para a otimização das argamassas, na medida em que lhes confere uma melhoria das suas características, em particular, aumentam a sua durabilidade e campo de aplicação (Pontes, Silva e Faria,2012).

Com a pesquisa que tem sido realizada ao longo dos anos, podemos apurar as vantagens na aplicação de escórias de alto-forno e cinzas volantes na produção de cimento Portland. Estas são:

- Redução do custo de produção do cimento assim como aumentar o fator de utilização de escórias de alto-forno e cinzas volantes.
- Redução do clínquer diminuindo a poluição do ar, reduzindo assim as emissões de CO₂, SO₂ e NO_x (Xuequan et al,1999).
- Maior resistência à abrasão;
- Menor evolução de calor de hidratação;
- Melhor resistência aos sulfatos (Shi,2004).

3.3.1 Escórias de alto-forno

A escória de alto-forno é um subproduto do processo metalúrgico, obtido durante a fundição dos metais, quando as impurezas são separadas e removidas em diversas faixas granulométricas. A sua constituição química corresponde a uma mistura de óxidos, silicatos metálicos, metais nas formas mais elementares tendo como componentes básicos

os óxidos de cálcio (Ca), ferro (Fe), magnésio (Mg) e alumínio (Al), entre outros (Neville, 1997).

Uma composição similar a esta é aceite nos cimentos Portland podendo, quando necessário, adicionar calcário à escória, para que esta atinja a composição do cimento (Rezende, 2004).

Outros autores dizem de forma mais pormenorizada, que a composição química varia muito com a matéria-prima e com o processo de produção. O que se pode concluir que contém: CaO (óxido de cálcio) 45% - 60%, SiO₂ (sílica) 10% - 15%, Al₂O₃ (óxido de alumínio) 1%-5%, F₂O₃ 3%-9%, MgO (óxido de magnésio) 3% - 13%, FeO (óxido de ferro) 7% - 20% e P₂O₅ (pentóxido de fósforo) 1% - 4%. Composições minerais da escória de aço incluem: Olivina, merwinite, silicato dicálcico (C₂S), silicato tricálcico (C₃S), aluminoferrato tetracálcico (C₄AF), ferrato dicálcico (C₂F), solução sólida CaO-FeO-MnO-MgO (fase RO) e livre – CaO. A presença de C₃S, C₂S, C₄AF e C₂F confere à escória de aço propriedades cimentícias (Wang et al, 2012).

3.3.2 Cinzas volantes

As cinzas volantes são resíduos provenientes da combustão do carvão. São produzidas em centrais termoelétricas que usam carvão mineral para produzir calor. [3] São compostas essencialmente por SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, CaO e MgO (Shi e Qian, 2000).

Perante o estudo realizado em (Faria, 2004), ao comportamento de argamassas com cinzas volantes, conclui-se que apresentam resistências mecânicas crescentes com o aumento do teor em cinzas das argamassas e, no caso da compressão a 90 dias, particularmente elevadas nas argamassas sujeitas a cura húmida com traços de médio e elevado teor em cinzas. Há indicação no estudo que, segundo a avaliação da composição química da cal aérea e dos componentes pozzolânicos, verificou-se que, relativamente à alumina, o teor aumenta com a duração e temperatura atingida no tratamento térmico. Ou seja, entre os componentes pozzolânicos a alumina apresenta maior expressão nos caulinos e menor nas cinzas volantes.

3.3.3 Metacaulino

O caulino é um material mineralógico e no território nacional ocorre em depósitos, relacionados com a alteração de zonas graníticas do Noroeste de Portugal e ao longo de uma faixa costeira próxima do litoral. Mas pode obter-se esta matéria-prima como resultado dos resíduos finos obtidos na indústria de fabricação de tijolos.

O caulino é um material composto essencialmente de aluminossilicatos hidratados, como a caulinite, que apesar de ser o principal componente pode ser substituída ou estar associada a outros minerais (Faria, 2004)

A **caulinite** é pois o mineral que domina e o responsável pelo valor comercial e tecnológico do caulino, pelo que se analisa somente a sua estrutura e as suas características mineralógicas e químicas deixando de parte os outros componentes. A fórmula estrutural da célula unitária de caulinite, $\text{Al}_4\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$, corresponde a seguinte composição percentual aproximada: 13,96% de H_2O ; 39,50% de Al_2O_3 e 46,54% de SiO_2 .

Como referido anteriormente, o cimento *Portland* é um aglomerado obtido pela pulverização do *clínquer* resultante da calcinação a cerca de 1400°C ate fusão incipiente duma mistura de calcário e argila.

A argila é selecionada com base na composição química pois é ela que faculta a sílica e alumina que o sistema requer. Um teor em óxido de magnésio em excesso no cimento pode ser perigoso. E por este motivo que o caulino constitui um mineral adequado uma vez que possui apenas alumínio e sílica e reduzidos teores em magnésio. Caulinos com baixos teores em ferro são utilizados no fabrico de cimento branco.

A introdução de pozolanas, como o metacaulino, no cimento tem sido uma prática atual, a sua utilização como substituição parcial do cimento, tem como objetivo a produção extra de silicatos de cálcio hidratados que são compostos mais estáveis do que o cimento hidratado. As vantagens técnicas da aplicação de pozolanas são várias destacando-se o aumento da resistência mecânica, a redução ou inibição da reação alcalis-agregado, o aumento da resistência a cloretos, sulfatos e água do mar e a nível económico através da redução do consumo de cimento *Portland* e pelo facto dos materiais pozolânicos serem energeticamente mais económicos que o clínquer do cimento Portland (Vasconcelos, 2008).

4. Fabrico e aplicação de argamassas

4.1 Generalidades

4.1.1 Definição de argamassa

Segundo European Mortar Industry Organization (EMOdic, 2001), uma argamassa pode definir-se como uma mistura de agregados, um ou mais ligantes orgânicos ou inorgânicos e eventualmente aditivos e/ou adjuvantes.

Às argamassas podem, adicionar-se certos elementos que irão favorecer determinadas características da pasta. Desta maneira, adjuvantes ou pozolanas poderão ser adicionados.

Os ligantes são componentes utilizados para ligar ou aglomerar outros materiais tais como areias ou gravilhas. Com o tempo, modificam a estrutura química e contribuem para o endurecimento da pasta.

No que diz respeito aos agregados, estes têm grande influência no desempenho das argamassas. Fatores como a dureza dos grãos, a granulometria e a porosidade afetam o comportamento das argamassas, não esquecendo, a origem e o estado de limpeza da areia, fatores que podem afetar as características da argamassa.

As pozolanas ou adições são materiais que, por si só, não têm características de ligantes, mas quando combinados com a cal à temperatura normal e na presença da água, formam compostos insolúveis estáveis que possuem propriedades ligantes.

Por fim, e não menos importante, os adjuvantes são produtos que quando adicionados aos materiais conferem determinadas propriedades e anulam efeitos negativos no seu comportamento. Grande parte destes adjuvantes têm origem sintética e a sua utilização deve ser moderada em argamassas, pois ainda não se conhece o seu efeito a longo prazo (Margalha, 2011).

4.1.2 Classificação das argamassas:

A Norma Europeia *EN 998-2:2013* classifica as argamassas segundo três parâmetros fundamentais:

- **Local de produção** (argamassas industriais, argamassas industriais semi – acabadas e argamassas tradicionais)
- **Conceção** (argamassas de desempenho e argamassas de formulação)
- **Aplicação** (argamassas de alvenaria, argamassas de revestimento, argamassas de regularização de pavimentos, argamassas de juntas e argamassas - cola)

No presente trabalho, serão consideradas de aplicação em particular “argamassas – cola”.

4.1.3 Funções das argamassas:

Em edifícios antigos, é vasta a lista de funções que as argamassas desempenham: função estrutural como constituinte fundamental das alvenarias, aglomerando pedras ou blocos; função de proteção no refechamento de juntas e em revestimentos exteriores de paredes; função de colagem de ladrilhos e azulejos; função decorativa em estuques e barramentos, etc (Veiga,2012).

4.2 Elementos de fixação – cimento cola

4.2.1 Definição e caracterização dos seus constituintes

As argamassas para assentamentos de ladrilhos são denominadas por argamassas-cola ou argamassas adesivas. Estas argamassas caracterizam-se pela sua espessura fina e pela formação de cordões. São produzidas industrialmente e fornecidas na forma de mistura pré-doseada em pó, dependendo a sua composição do tipo de suporte, de revestimento e de ambiente em que se encontra inserido (Almeida e Sichieri, 2006; CEN, 2007).

Como definido previamente, as argamassas são uma mistura de agregados, ligantes e adjuvantes. A mistura deve ser homogênea e as proporções administradas de acordo com a argamassa que se pretende. Sendo muito importante conhecer e saber caracterizar os constituintes das mesmas.

Por isso de uma forma resumida, apresenta-se uma argamassa como segundo as indicações da Figura 2

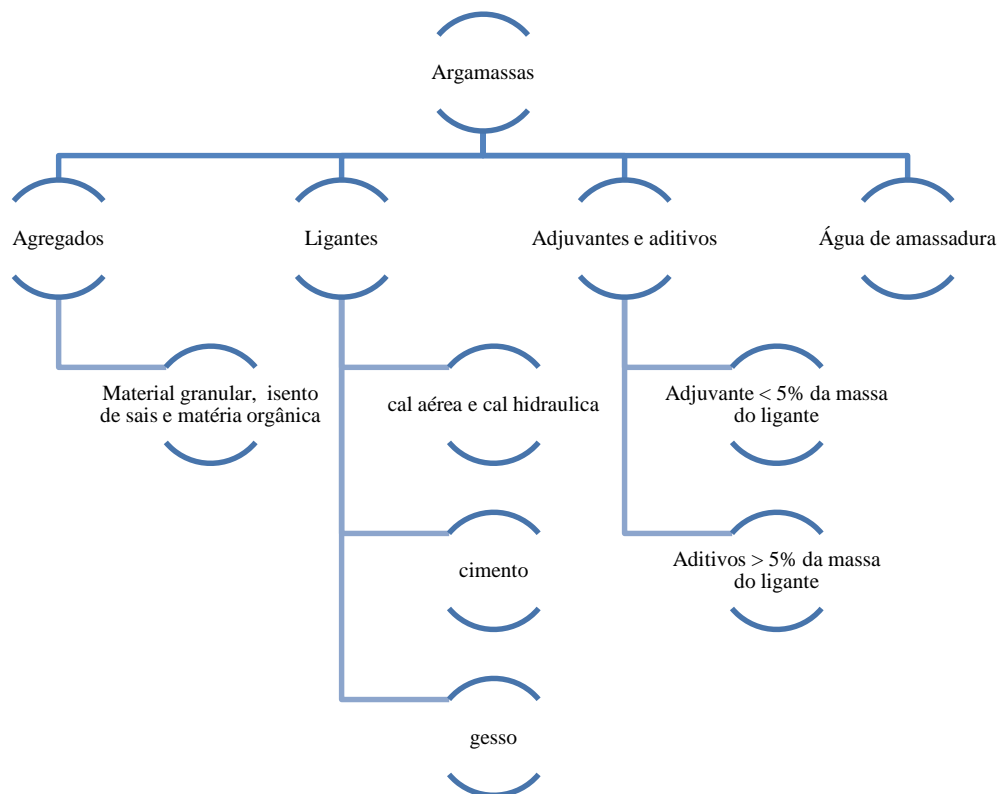


Figura 2 – Diagrama com a composição genérica das argamassas

a) Agregados

Definem-se normalmente como um material granular que por norma não intervém na reação de endurecimento da argamassa (Paulo,2006).

Os agregados são geralmente areia, podendo conter por vezes cascalho, brita ou até fragmentos cerâmicos mas em reduzidas percentagens (Costa,2008).

Têm como função diminuir a retração, melhorar a compacidade, impermeabilidade e resistência mecânica da argamassa, sendo deste modo o constituinte que, na maioria dos casos, apresenta uma maior percentagem nas argamassas.

As propriedades dos agregados tais como inércia química baixa, baixo coeficiente de expansão e durabilidade são fundamentais, mas a gradação das partículas e a sua forma assumem um papel de relevo. Os agregados naturais usualmente apresentam uma forma arredondada e lisa, por outro lado temos os agregados artificiais, provenientes do esmagamento das rochas (industrializados), que apresentam formas angulares que coadjuva a compactação das partículas, originando uma argamassa menos porosa e com uma melhoria substancial na resistência mecânica (Marques,2005)

No decorrer da campanha experimental, do presente trabalho, apenas serão usados agregados finos no desenvolvimento das argamassas a estudar, sendo neste caso, mais especificamente as areias siliciosas.

b) Ligantes

Ligante inorgânico ou de origem mineral é o nome que mais habitualmente se dá ao material, finamente moído, que estimula a ligação entre os diversos materiais que são adicionados à mistura que resultará em argamassa. Esta ligação é promovida devido a reações de hidratação e / ou carbonatação entre o pó ligante e a água (e/ou ar), tendo por isso como função a ligação dos grãos dos agregados, conferindo coesão e resistência (Paulo,2006).

Sendo assim, estes podem ser: ligantes hidráulicos e ligantes aéreos.

- i) Ligantes hidráulicos: adquirem forma sólida após endurecimento por reação com a água quer ao ar, quer imerso em água. Este tipo de ligante é designado por hidráulico porque apesar de endurecer ao ar, tem a capacidade de obter elevada resistência quando imerso.
- ii) Ligantes aéreos: é a categoria mais antiga de ligantes. São designados aéreos porque o seu endurecimento ocorre apenas em contacto com o ar, e a sua inclusão na formulação de argamassas torna-as não resistentes à água (Coutinho, 1997; Martins e Paiva, 2010).

Os materiais mais utilizados como ligantes são: o cimento Portland, o gesso e a cal, podendo esta dividir-se em cal aérea e hidráulica. É importante referir que estes ligantes podem não só ser adicionados individualmente mas também combinados entre si, se houver compatibilidade, de maneira a serem aproveitadas as características mais importantes de cada um dos constituintes. (Vieira,2012)

Ligante de cimento

O cimento é o ligante mais comum na construção civil. Apresenta-se como um ligante hidráulico de cura rápida e de fácil trabalhabilidade. Permite a produção de argamassas de elevada resistência, baixa permeabilidade e com boa resistência à cristalização de sais no interior dos poros. No entanto é um ligante que confere maior introdução de sais no sistema, podendo originar patologias (Oliveira et al., 2007, Oliveira, 2008).

O uso deste ligante para o fabrico de argamassas, varia consoante a aplicação do produto a fabricar. Assim, no caso dos cimentos-cola, utilizam-se os cimentos de resistência em compressão mais elevada. Outros aspetos, como a finura e sulfatos, são igualmente considerados (Varela, 2005).

A resistência à compressão é um aspeto importante particularmente para os cimentos-cola mais técnicos, com maiores exigências ao nível da aderência. A finura tem particular interesse na fabricação de produtos que sejam aplicados através de equipamentos de projeção, de forma a facilitar esta operação (Varela, 2005).

O teor de sulfatos indica a quantidade de gesso adicionada ao cimento. No entanto, sendo útil para o controlo do tempo de presa, em excesso pode dar origem à formação de sais expansivos que colocam em risco a estrutura do cimento hidratado (Varela, 2005).

Uma gama de cimento muito utilizada no fabrico de argamassas-cola, é o cimento branco. Este distingue-se do cimento cinzento, essencialmente ao nível da cor, sendo a seleção de matérias-primas de qualidade, o calcário branco e o caulino, determinante para a brancura final do produto. As matérias-primas têm de possuir baixos teores em óxidos ferrosos, responsáveis pela pigmentação cinzenta (Martins, 2010).

Ligante de gesso

O gesso é um material que se apresenta na natureza como sulfato de cálcio, CaSO_4 , na forma hidratada. Apresenta-se como um material de presa rápida, de fácil obtenção e com um dispêndio energético reduzido na sua produção uma vez que não necessita de altas temperaturas. No entanto apresenta uma baixa resistência e solubilidade elevada (Marques, 2005).

Ligante de cal

A cal foi até ao início do século XX o ligante mais usado na construção, altura em que surge o cimento Portland com maior utilização no país. No entanto devido a necessidades de reabilitação do património edificado, surgem cada vez mais argamassas de cal, uma vez que não apresenta problemas de incompatibilidade neste tipo de obras (Seabra et al., 2007).

O ligante de cal aérea é essencialmente constituído por hidróxido de cálcio, podendo conter algum óxido de cálcio. Este tipo de ligante endurece muito lentamente quando expostos ao ar por reação com o dióxido de carbono presente na atmosfera. Este ligante proporciona argamassas muito macias e de plasticidade muito elevada o que as torna perfeitas em obras de reabilitação de edifícios antigos. No entanto apresenta um tempo de presa e de endurecimento extremamente lentos, o que à luz do ritmo de construção atual muitas vezes torna impossível a sua aplicação. É um material que tem ainda de ser aplicado em camadas finas uma vez que apresenta uma contração volumétrica elevada o que pode originar tensões críticas e fissuração (Costa, 2008).

O ligante de cal hidráulica apresenta como grande diferença em relação ao anterior o fato de endurecer quando misturado com água, uma vez que hidrata rapidamente, formando uma película semipermeável, permitindo um período de trabalhabilidade ao retardar o seu endurecimento por determinado período. Após este período de trabalhabilidade o endurecimento é retomado devido à hidratação da camada protegida pela película formada. Proporciona argamassas de boa trabalhabilidade, boa aderência, redução de fissuração, boa resistência mecânica e bom acabamento final (Marques, 2005, Paiva et al., 2007).

c) Adjuvantes e aditivos

Os adjuvantes e os aditivos são componentes adicionados às argamassas em reduzidas quantidades para que estas adquiram determinadas características adaptando-as a determinadas condições de uso e desempenho específico (Costa, 2008).

Segundo A. Coutinho (Coutinho, 1997), designa-se por adjuvante a substância utilizada em percentagem inferior a 5% da massa de ligante, adicionada durante a amassadura aos componentes normais das argamassas com o fim de modificar certas propriedades destes materiais, quer no estado fluido, quer no estado solido, quer ainda no momento da passagem de um estado a outro.

As substâncias adicionadas em quantidades superiores a 5% da massa de ligante ou que não tenha qualquer ação em qualquer estado físico denominam-se adições (Paulo, 2006).

De modo a classificar os adjuvantes foi adotada pelo RILEM na conferência de Paris em 1967, a seguinte classificação (Paulo, 2006):

- Modificadores da reologia da massa fresca:
 - Plastificantes / redutores de presa;
 - Introdutores de ar;
 - Plastificantes / introdutores de ar;
 - Retentores de água;
 - Promotores de aderência / coesivos (em vários contextos industriais, estes agentes também são designados por ligantes de origem orgânica (ou ligantes orgânicos));
- Modificadores do tempo de presa:
 - Ativadores de endurecimento;
 - Aceleradores de presa;
 - Retardadores de presa;
 - Impermeabilizantes e hidrofugantes;
 - Expansivos.

d) Água de amassadura

A água de amassadura é um elemento fundamental para que ocorram as reações de hidratação nas argamassas de cal hidráulica e de cimento. Nas argamassas de cal aérea, este elemento da mistura é importante para a trabalhabilidade da argamassa mas não para o endurecimento desta. Esta água deve ser introduzida na mistura na quantidade certa sob pena de criar vazios e uma retração excessiva nas argamassas. Esta água em excesso é denominada água livre. Assim sendo, a água introduzida na mistura deve corresponder à água de molhagem do agregado, somada com a água necessária à hidratação do ligante e à necessária para a trabalhabilidade da argamassa (Coutinho, 1997, Paiva, 2005).

A água de amassadura deve ser de boa qualidade, não apresentando partículas dissolvidas, em suspensão ou cheiros anormais. Em geral, recomenda-se água potável de modo a não alterar os requisitos exigidos às argamassas (Paiva, 2005).

4.2.2 Enquadramento normativo

São inúmeros os documentos normativos que definem e caracterizam as argamassas – cola, entre eles temos por exemplo a British Standards Institutions (BSI) e a American National Standards Specifications (ANSI), mas nesta dissertação será unicamente abordada a Norma Europeia EN 12004 que o CEN apresenta.

A Norma Europeia EN 12004 – *Adhesives for tiles – Definitions and Specifications* [26] define os cimentos-cola da seguinte forma:

- *Mistura de ligantes hidráulicos, agregados e aditivos orgânicos. As colas são misturadas com água ou com o líquido de adição imediatamente antes da sua utilização. Os cimentos cola são designados como tipo C.*
- *- Cola em dispersão aquosa: mistura de ligantes hidráulicos sob a forma de polímeros em dispersão aquosa, de aditivos orgânicos e de cargas minerais finais. A mistura está pronta a aplicar. As colas em dispersão aquosa são designadas como tipo D.*

- - *Cola de resinas de reação: mistura de resinas sintéticas, cargas minerais e aditivos orgânicos, em que o endurecimento ocorre por reação química. São apresentadas sob a forma de um ou mais componentes. As colas de resinas de reação são designadas como tipo R.*

A classificação dos três tipos de cola, apresentados anteriormente, é feita pela EN 12004 com base na sua composição química. Ao longo desta dissertação vamos apenas nos debruçar no cimento – cola (C).

Dentro do grupo dos cimentos-cola, estes podem ser divididos em classes (Tabela 1) que dependem das características fundamentais e opcionais. Sendo as características fundamentais as propriedades que têm necessariamente que apresentar e as características opcionais representam as propriedades requeridas para aplicações específicas (CEN, 2007).

Tabela 1 – Classes de colas segundo a EN 12004

<i>Características Fundamentais</i>
1 – Normal
2 – Melhorada
<i>Características Opcionais</i>
E – Tempo de abertura alargado
F – Presa rápida
T – Resistência ao deslizamento vertical
S1 – Deformável
S2 – Altamente deformável

A resistência de aderência inicial, após imersão em água, após ação do calor e após ciclos de gelo – degelo e tempo de abertura, são os requisitos que a norma EN 12004 especifica para as características fundamentais [Tabela 2. a) e 2.b)].

Tabela 2.a) - Especificações para cimentos cola – características fundamentais (EN 12004)

Características fundamentais		
1a	Cimentos-Cola de Presa Normal	
Característica	Requisito	Método de ensaio
Tensão de aderência inicial	$\geq 0,5 \text{ N/mm}^2$	8.2 da EN 1348:2007
Tensão de aderência à tração após imersão em água	$\geq 0,5 \text{ N/mm}^2$	8.3 da EN 1348:2007
Tensão de aderência à tração após ação do calor	$\geq 0,5 \text{ N/mm}^2$	8.4 da EN 1348:2007
Tensão de aderência à tração após ciclos de gelo-degelo	$\geq 0,5 \text{ N/mm}^2$	8.5 da EN 1348:2007
Tempo aberto: tensão de aderência à tração	$\geq 0,5 \text{ N/mm}^2$ após não menos de 20 min	EN 1346

Tabela 2. b) - Especificações para cimentos cola – características fundamentais (EN 12004)

Características fundamentais		
1b	CIMENTOS-COLA DE PRESA RÁPIDA	
Característica	Requisito	Método de ensaio
Tensão de aderência rápida à tração	$\geq 0,5 \text{ N/mm}^2$ após não mais de 6h	8.2 da EN 1348:2007
Tempo aberto: tensão de aderência à tração	$\geq 0,5 \text{ N/mm}^2$ após não mais de 6h	EN 1346
Todos os outros requisitos em 1a		EN 1346

Os requisitos que a norma específica para as características opcionais são: tempo de abertura, deformação transversal e resistência de aderência inicial após imersão em água, após ação do calor e após ciclos de gelo – degelo [Tabela 3].

Tabela 3 - Especificações para cimentos cola – características opcionais (EN 12004)

Características Opcionais		
1c	Características Especiais	
Característica	Requisito	Método de ensaio
Deslizamento	$\leq 0,5 \text{ mm}$	EN 1308
Tempo aberto prolongado: tensão de aderência à tração	$\geq 0,5 \text{ N/mm}^2$ após não menos de 30 min	EN 1346
Cimento-cola deformável: deformação transversal	$\geq 2,5 \text{ mm}$ e $< 5 \text{ mm}$	EN 12002
Cimento-cola altamente deformável: deformação transversal	$\geq 5 \text{ mm}$	EN 12002
1d	Características Adicionais	
Característica	Requisito	Método de ensaio
Elevada tensão de aderência inicial à tração	$\geq 1 \text{ N/mm}^2$	8.2 da EN1348:2007
Elevada tensão de aderência à tração após imersão em água	$\geq 1 \text{ N/mm}^2$	8.3 da EN1348:2007
Elevada tensão de aderência à tração após ação do calor	$\geq 1 \text{ N/mm}^2$	8.4 da EN1348:2007
Elevada aderência à tração após gelo-degelo	$\geq 1 \text{ N/mm}^2$	da EN1348:2007

4.2.3 Propriedades dos cimentos cola

A norma EN 12004 define, propriedades de aplicação e propriedades finais, para os cimentos cola. As propriedades de aplicação, dizem respeito a:

- Tempo de vida útil - período de tempo durante o qual uma cola, armazenada em condições definidas, conserva as suas propriedades de aplicação;
- Tempo de repouso (maturação) - período de tempo entre a preparação de uma cola e o momento em que esta deve ser aplicada;

- Tempo de vida - máximo período de tempo após preparação de uma cola, durante o qual ela é utilizável;
- **Tempo aberto** - máximo período de tempo para a fixação dos ladrilhos desde o momento de aplicação de uma cola, permitindo cumprir a tensão de aderência especificada;
 - **Poder molhante e transferência** - aptidão de uma camada de cola penteada para molhar os ladrilhos;
 - **Deslizamento** - Deslocação, sobre uma superfície vertical ou inclinada, de um ladrilho aplicado sobre uma camada de cola penteada;
 - **Tempo de ajustabilidade** - máximo período de tempo durante o qual a posição de um ladrilho na camada de cola pode ser corrigida após colocação, sem perda significativa da aderência final.

As propriedades finais esclarecidas na norma são:

- **Tensão de aderência** - força máxima de rotura por unidade de superfície, que pode ser medida com aplicação de uma força de tração ou de corte;
- **Deformação transversal** – deflexão registada no centro de uma camada de cola endurecida submetida a uma carga aplicada em três pontos.

5. Procedimento experimental

Neste capítulo faz-se a caracterização dos materiais utilizados nas formulações estudadas e descreve-se o processo de avaliação das mesmas. Inicialmente procede-se á caracterização da matéria-prima que se pretende estudar, a escória de alto-forno, de seguida caracteriza-se as formulações às quais esta matéria-prima foi adicionada realizando uma campanha de ensaios no que diz respeito às várias fases, produto em pó, em pasta e endurecido.

5.1.Desenvolvimento e preparação das formulações

Como foi mencionado anteriormente, o objetivo deste trabalho é desenvolver uma argamassa – cola com características compatíveis com os suportes antigos a reabilitar. Desta maneira, numa primeira abordagem, procedeu-se à análise de resultados característicos de duas argamassas à base de cimento produzidas e comercializadas pela Saint-Gobain Weber. De seguida desenvolveram-se formulações com substituição parcial do cimento por escória de alto-forno em que o cimento se apresenta como componente maioritário.

Numa segunda abordagem, realizaram-se formulações em que o cimento foi parcialmente substituído por escória de alto-forno a ponto de ser o componente maioritário.

Por fim estudaram-se formulações em que o cimento foi substituído na totalidade por escória de alto-forno.

Estas argamassas foram estudadas, essencialmente, do ponto de vista do tempo de presa e resistência à tração perpendicular.

As argamassas estudadas encontram-se descritas, de forma sucinta, na tabela 4.

Tabela 4 – Descrição das várias argamassas estudadas e respetiva designação

Argamassas estudadas	Designação	Descrição
Argamassas de cimento	CCP.00	Cimentos – cola de presa normal com tempo aberto alongado e deslizamento reduzido, variando no tipo de aditivos utilizados.
	CFL.00	
Substituição parcial de cimento por escória de alto-forno	CPP.0x e CFL.0x	Argamassa-cola com combinação de OPC com escória de alto-forno, variando a quantidade de cimento - x varia de 1 a 6
	C1.01.x	Argamassa-cola com combinação de OPC com escória de alto-forno, variando a quantidade de cimento – cola.
Substituição total de cimento por escória de alto-forno	C2S.0x	Argamassa – cola com base em escória de alto-forno com introdução de diferentes aditivos.

5.2. Ensaio de caracterização

5.2.1. Caracterização das matérias-primas

Foram caracterizadas nesta dissertação dois tipos de escória de alto-forno que apresentamos como E e EP.

5.2.1.1. Análise granulométrica

De acordo com a *NP EN 1015-1 Methods of test for mortar for masonry – Part1: Determination of particle size distribution* e *NS EN 933-1(2012) Tests for geometrical properties of aggregates Part 1 : Determination of particle size distribution Sieving methos*, este método consiste em definir a forma de determinar a distribuição granulométrica de uma determinada matéria-prima ou argamassa.

Os equipamentos a utilizar são uma balança de precisão 0.1g e um jogo de peneiros (nota: deve-se utilizar os peneiros com as respetivas malhar sugeridas pela ficha de homologação de matéria – prima ou especificação técnica).



a) Balança de precisão



b) Jogo de peneiros

Figura 3 – Equipamentos para análise granulométrica

Descrição do método:

- Pesar 100g da amostra a analisar e coloca-la no módulo superior do jogo de peneiros selecionado;
- Peneirar durante aproximadamente 5 minutos manualmente ou recorrendo ao vibrador de peneiros (este tempo é meramente indicativo e depende de fatores como: humidade da amostra, grau de finura);
- Colocar os peneiros na balança individualmente;
- Tarar a balança;
- Remover o produto que se encontra no peneiro com o auxílio de uma escova (ter em atenção a forma de limpeza sobretudo nos peneiros de malha mais fina, para não danificar a malha);
- Repetir o procedimento para todos os peneiros.

Análise dos resultados:

Com as percentagens de produto retido em cada peneiro, poder-se á construir a curva granulométrica acumulada, cujos valores se determinam considerando o valor de 100% para o peneiro de maior abertura de malha e para os restantes peneiros, determina-se a diferença entre a % de acumulado no peneiro de maior abertura de malha e a % de produto retido no peneiro em questão.

5.2.1.2. Difração de Raios - X

A análise de difração de raios X (DRX) permite a obtenção de informação qualitativa relativa aos compostos cristalinos existentes nas pozolanas. É uma técnica experimental, não destrutiva, muito importante na caracterização dos sólidos. Utilizou-se um difractómetro Rigaku Geigerflex D/Max-Series e as análises realizam-se entre 0 e 80° (2θ). O difractograma é obtido pela incidência de um feixe de raios X, (de comprimento de onda conhecido) na amostra pulverizada, seguido da sua difração pelos cristais da amostra, sendo o sinal do feixe difratado recolhido por um detetor que regista a intensidade em função do ângulo (2θ) entre o plano atómico e os feixes incidente e difratado. Esta condição é descrita pela lei de Bragg, dada por: $2d \sin \theta = n\lambda$, sendo d a distância entre planos atómicos equivalentes, θ o ângulo de reflexão, n um número inteiro e λ o comprimento de onda (Linhares, 2011).

5.2.1.3. Método BET

O método de BET baseado na Teoria de Adsorção Multicelular envolve a adsorção física de moléculas de gás sobre uma superfície sólida e serve como base para uma técnica de análise importante para a medição de área superficial específica de um material, em especial aqueles com porosidade aberta distinta. Desde a sua publicação, o método de BET tornou-se a ferramenta de interpretação mais importante e útil no campo da adsorção física de gases. (Brunauer, S, Emmet, P.H., Teller, E.)

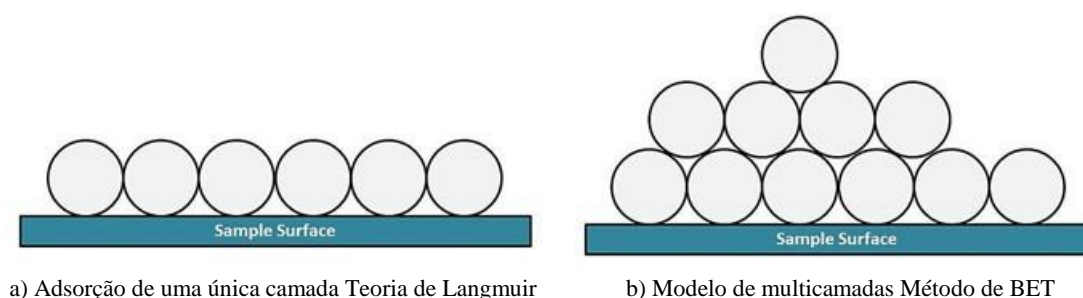


Figura 4 – Modelo esquemático da adsorção física de moléculas de gás sobre a superfície de um sólido (*fonte: commons.wikimedia.org*)

5.2.1.4. Análises térmicas (ATD/TG)

Para a caracterização dos materiais foram realizadas as seguintes análises térmicas: diferencial (ATD) e gravimétrica (ATG).

A análise térmica diferencial regista a variação da temperatura da amostra devido a reações exotérmicas (com libertação de calor) ou endotérmicas (com absorção de calor), relativamente a um material inerte de referência, geralmente alumina. A análise térmica gravimétrica regista a alteração da massa da amostra durante o aquecimento. O ensaio foi realizado no equipamento TG/DSC, da SATARAM Labsys, preparado para a análise simultânea ATD/TG, numa gama de temperaturas até aos 1100°C, com uma taxa de aquecimento de 10°C/minuto (Lopes,2008)

5.2.1.5. Distribuição do tamanho da partícula

As pozolanas são caracterizadas em termos de distribuição granulométrica, por difração a laser, realizada no equipamento Beckman Coulter LS 230. A difração a laser mede as distribuições de tamanho das partículas por medição da variação angular na intensidade da luz difundida à medida que um feixe de laser interage com as partículas dispersas da amostra. Partículas grandes dispersam a luz em pequenos ângulos em relação

ao feixe de laser e partículas pequenas dispersam a luz em ângulos grandes. Os dados sobre a intensidade da dispersão angular são então analisados para calcular o tamanho das partículas responsáveis por criar o padrão de dispersão, com base na teoria de difusão da luz de Mie. O tamanho das partículas é indicado como o diâmetro de uma esfera de volume equivalente.

As principais razões para o sucesso desta técnica são:

- Medições rápidas;
- Repetibilidade – grande número de partículas reveladas a cada medição;
- Técnica bem estabelecida pela ISO13320 (2009).

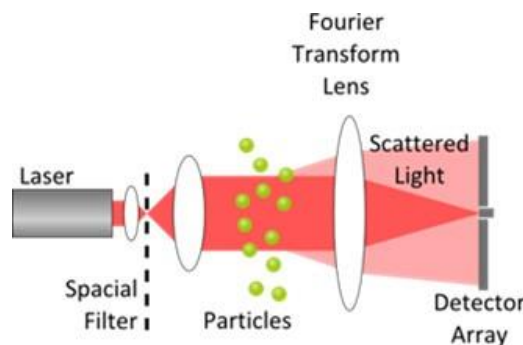


Figura 5 – Esquema explicativo do funcionamento da Difração Laser (fonte: innopharmalabs.com)

5.2.1.6. Avaliação da reatividade pozolânica

Procedeu-se à avaliação da reatividade pozolânica com o intuito de estudar o impacto das pozolanas em argamassas, de maneira a definir quais podem ser potencialmente utilizadas em argamassas – cola. Nesta fase é também estudado o efeito da adição de um ativador alcalino, que tem como objetivo acelerar as reações pozolânicas, que se conhecem como reações lentas e obter melhores resultados ao nível das resistências mecânicas (Shi e Day, 2000, 2001).

Esta análise consiste na realização de ensaios mecânicos, à flexão e à compressão, a provetes com dimensões de 40x40x160 mm³ procedentes de uma mistura à base de cal adicionada das pozolanas em estudo.

A *NP EN 196 – 1 Métodos de ensaio de cimentos Parte 1 Determinação das resistências mecânicas* e a *NP EN 1348 Colas para ladrilhos Determinação da resistência à tração de cimentos cola*, definem o método para proceder ao amassado de uma argamassa. Este método consiste em definir a forma de garantir uma boa homogeneização para posterior aplicação de determinada argamassa.

Para efetuar o amassado necessitamos dos seguintes equipamentos:



a) Balança de precisão



b) Amassadora automática

Figura 6 – Equipamentos para amassadura

O procedimento efetuado foi o seguinte:

Começou-se por determinar a percentagem de água do produto. Pesou-se uma amostra de 100g, amassou-se com a ajuda de uma espátula, adicionando a quantidade de água necessária até se conseguir a consistência e aspetos desejados. A pasta deverá ser pouco pegajosa e não aderir às ferramentas, não ser fluida, ser facilmente alisável e permitir a formação de esquinas e de uma bola de produto.

De seguida introduzir no recipiente da amassadora a quantidade de água, correspondente à percentagem determinada e o pó e homogeneizar cuidadosamente. Selecionar, na amassadora a velocidade lenta, deixar amassar 30 segundos, depois em 1 minuto raspar a pá e o recipiente procedendo à eliminação do produto que se encontra nas paredes laterais e no fundo do recipiente, e por fim mais 1 minuto na amassadora.

Depois de finalizado o amassado prepara-se os provetes 4x4x16 cm da realização o seguinte procedimento utilizando o equipamento apresentado na Figura 7:



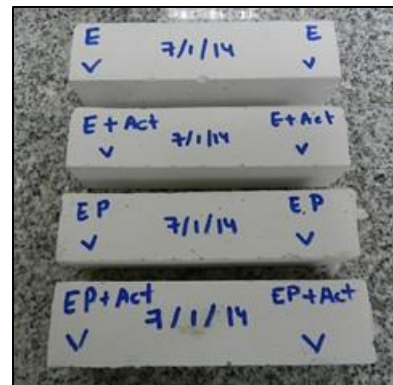
Figura 7 – Molde metálico

Encher o molde até metade e compactar deixando cair alternadamente cada extremo do molde de uma altura de aproximadamente 5 cm, por 10 vezes. Encher o restante do

molde dar novamente 10 pancadas e finalizar alisando a superfície com a ajuda de uma espátula de modo a retirar o excesso de produto. Colocar o molde na camara climatizada em condições de temperatura e humidade $23 \pm 2^\circ\text{C}$ e $50 \pm 5\%$ HR. Após 24h desmoldar e verificar a sua estabilidade. Se se mantiver estável, três provetes são colocados em cura húmida (Figura 8.a)) e os restantes mantidos em cura normal (cura seca) (Figura 8.b))



a) Provetes em cura húmida



b) Provetes em cura normal

Figura 8 – Provetes para ensaio de pozolanicidade

Após 3 dias, 7 dias e 28 dias obtiveram-se valores para resistência à compressão e flexão de provetes em cura seca e em cura húmida, com e sem ativador alcalino.

Os ensaios de flexão e compressão realizam-se seguindo a *EN 1015 – 11 Méthods d'essai des mortiers pour maçonnerie – Détermination de la résistance à la flexion et à la compression du mortier durci*.

Na Figura 9 encontra-se o equipamento utilizado para estes ensaios.



a) Prensa automática



b) Ensaio Flexão



c) Ensaio Compressão

Figura 9 – Equipamento ensaio flexão e compressão

Procedimento de ensaio de resistência à flexão:

Colocar o provete na máquina de ensaios de resistência à flexão com uma das faces laterais de moldagem sobre os cilindros de apoio e o seu eixo longitudinal perpendicular aos apoios e centrado em relação a estes.

Anotar a carga máxima (F_f) suportada pelo provete até à sua rutura.

Procedimento de ensaio de resistência à compressão:

Aproveitar as metades dos provetes resultantes do ensaio anterior.

Centrar lateral e longitudinalmente cada meio-provete em relação aos pratos da máquina de compressão. Tal como no ensaio anterior deverá ser uma das faces laterais de moldagem que ficará em contacto com os pratos do equipamento de ensaio de compressão.

Anotar a carga máxima (F_c) suportada pelo provete até à sua rutura.

5.2.2. Caracterização dos produtos em pó

A Cahiers du CSTB(2669-4) Modalités d'essais-A1.1:Massa volumique aparente e a Guía técnica UEAtc para la evaluación de colas para revestimientos cerâmicos; Diciembre 1990 apresentam o procedimento para a determinação da massa volúmica aparente do produto em pó. Os equipamentos utilizados e o procedimento seguido estão apresentados a seguir.



a) Balança de precisão



b) Copo cilíndrico de volume conhecido



c) Suporte de recipiente troncocónico com obturador

Figura 10 – Equipamento de determinação da massa volúmica aparente do produto em pó

Inicia-se o procedimento por encher o recipiente troncocónico com o produto. Pesar o copo de volume conhecido (M_0) e colocá-lo por baixo do recipiente troncocónico. Abrir completamente o obturador e se necessário ajudar a descida do pó com o auxílio de uma espátula. Quando o copo estiver totalmente cheio de produto, eliminar o excedente do pó, alisar a superfície com a ajuda de uma espátula. Pesar o copo contendo o pó.

Cálculo: $\rho_{pó} = \frac{M_1 - M_0}{V_c}$ em que M_1 e M_0 são respetivamente as massas com o

copo com a produto e vazio. V_c é o volume conhecido do copo.

5.2.3. Caracterização dos produtos em pasta

5.2.3.1. Determinação da água do amassado

Os equipamentos necessários para a determinação da água do amassado são:



a) Balança de precisão



b) Recipiente e espátula



c) Proveta graduada

Figura 11 – Equipamentos para determinação da água d amassado

Inicia-se o procedimento por pesar 200g do produto amassando logo de seguida com a ajuda de uma espátula adicionando a quantidade de água necessária até se conseguir a consistência e aspetos desejados. A pasta deverá ser bastante pegajosa, não deve ser excessivamente fluida, deverá ter elasticidade e não deverá deslizar da espátula.

Relacionando o peso da amostra e a quantidade de água adicionada obtém-se a percentagem de água do amassado.

Em posteriores amassados manuais, do mesmo produto, adiciona-se a percentagem de água determinada.

Procede-se a preparação do amassado sendo necessário introduzir no recipiente da amassadora a quantidade de água, correspondente à percentagem determinada e o pó e homogeneizar cuidadosamente. Selecionar, na amassadora a velocidade lenta, deixar amassar 30 segundos, depois em 1 minuto raspar a pá e o recipiente procedendo á eliminação do produto que se encontra nas paredes laterais e no fundo do recipiente, deixar mais 1 minuto na amassadora, posto isto, deixar o amassado repousar 2 minutos e por fim 15 segundos na amassadora e está concluído o processo de preparação do amassado, sendo possível avançar para o estudo do produto em pasta.

5.2.3.2. Determinação da massa volúmica aparente

Atendendo a EN 1015-6:1998/A1:2006 a massa volúmica aparente determina-se utilizando os seguintes equipamentos e seguindo o procedimento



Figura 12 – Equipamento de determinação da massa volúmica aparente do produto em pasta

Após o amassado estar concluído colocar o copo de volume conhecido vazio na balança e tarar a balança, de seguida encher o copo com massa até aproximadamente metade da sua capacidade e aglomerar o conteúdo com o auxílio da mesa de compactação dando 5 pancadas com a cadência de aproximadamente 1 segundo por pancada. Acabar de encher o recipiente e repetir a compactação de forma idêntica à anteriormente referida. Eliminar o excedente do produto, alisando a superfície com auxílio de uma espátula e por fim pesar.

Cálculo:

$$\rho_{pasta} = \frac{M}{V_c}$$

em que M é a massa pesada e V_c é o volume conhecido do copo.

5.2.3.3. Determinação do tempo de presa

A EN NO 196-3: *Métodos de ensaios de cimentos. Determinação do tempo de presa e expansibilidade* e *Guía Técnica UEAtc para la evaluación de colas para revestimientos cerámicos; Diciembre 1990* e descreve o modo de determinar, por meio de penetração de uma agulha, o tempo que decorre entre o instante em que a pasta inicia a presa até ao instante em que o produto está completamente endurecido.

Os equipamentos necessários para o procedimento são:



a) Base e molde



b) Aparelho VICAT automático

Figura 13 – Equipamentos determinação tempo de presa

Depois de amassado o produto, introduzir a pasta no molde e enchê-lo na totalidade, sem compactação nem trepidação excessivas. Retirar o excesso de pasta com o auxílio de uma espátula em movimentos retilíneos tipo serra, de modo a deixar a superfície com aspeto liso. Assegurar a limpeza da agulha do aparelho VICAT e seleccionar no painel frontal o intervalo de tempo de caída da mesma, bem como, a norma que se pretende utilizar, que, caso indicações contrárias será a *EN-196*. Introduzir o papel de registo gráfico, no suporte superior do equipamento. Colocar o molde por baixo da agulha centrado com a base do equipamento e iniciar o ensaio.

Em relação aos resultados temos de analisar o papel de registo:

- O início de presa é dado pelo instante em que a agulha deixa de penetrar até a uma distância constante da base;
- O fim de presa é dado pelo instante em que a agulha começa a penetrar a uma distância constante no produto e que portanto não penetra na massa.

5.2.3.4. Determinação da capacidade de retenção de água

A *Cahiers du CSTB (2669-4). Modalités d'essais- A1.2: Retencion d'eau* e o *Guía Técnica UEAtc para la evaluación de colas para revestimientos cerámicos; Diciembre 1990* definem o método de ensaio que permite medir a capacidade de uma argamassa reter a água do amassado.

Os equipamentos utilizados para realizar este ensaio foram:



a) Balança de precisão



b) Molde e papel de filtro



c) Bomba de vácuo e equipamento de retenção

Figura 14 – Equipamentos determinação da retenção de água

Inicia-se o procedimento começando por colocar o papel de filtro no recipiente da retenção de água e humedece-lo com 2.0 g de água. De seguida deve-se tarar o conjunto e encher de massa o recipiente alisando a superfície com o auxílio de uma espátula, de modo a retirar o excesso de produto e por fim pesar o conjunto (P_0). Submeter à ação do vácuo durante 3 minutos, posto isto secar o fundo do recipiente e pesar (P_1).

Para a determinação da percentagem de água retida é necessário realizar uma sequência de cálculos apresentados seguidamente:

1º Determina-se a quantidade de água perdida (g):

$$\text{Água perdida} = P_1 - P_0$$

2º Sabendo qual a percentagem de água do amassado, determina-se a quantidade de água presente na massa inicial de produto:

$$\text{Quantidade de água na massa inicial} = \frac{P_0 \times \% \text{Água do amassado}}{100 + \% \text{Água do amassado}}$$

3º Sabendo a quantidade de água presente na massa inicial e a quantidade de água que se perdeu, é possível determinar a percentagem de água perdida:

$$\% \text{Água Perdida} = \frac{100 \times (P_1 - P_0)}{\text{Quantidade de água na massa inicial}}$$

4º Deste modo a percentagem de água retida determina-se através de:

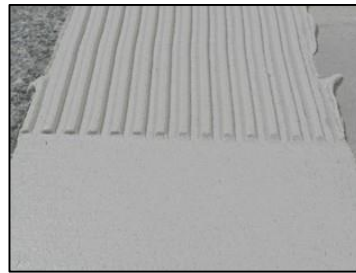
$$\% \text{Água Retida} = 100 - \% \text{Água Perdida}$$

5.2.3.5. Poder molhante e transferência

A *Guía Técnica UEAtc para la evaluación de colas para revestimientos cerámicos; Diciembre 1990* e a *EN 1347: Adesives for tiles. Determination of weatting capability* definem o modo de avaliação do poder molhante e transferência de um cimento cola. O método e equipamentos necessários são os apresentados nas Figuras 15 e 16.



a) Talocha, peso, vidro e cronómetro



b) Penteado

Figura 15 – Equipamentos e procedimento poder molhante (parte 1)

Sobre uma placa de betão e com o auxílio da parte lisa de uma talocha aplicar uma capa fina de produto de modo a humedecer toda a área em que vais ser aplicado o produto. Com a parte dentada da talocha, mantida num ângulo de cerca de 60° em relação ao suporte aplicar uma camada de produto.



a) Vidro sobre produto



b) vidro com peso de 2kg



c) Poder Molhante



d) Transferência

Figura 16 - Equipamentos e procedimento poder molhante (parte 2)

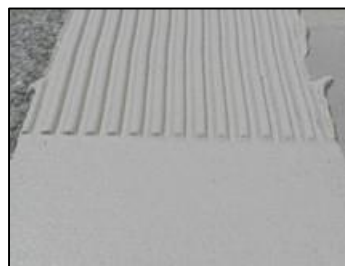
Passados 5 minutos do início da contagem de tempo de ensaio, coloca-se a peça de vidro, com dimensões 50x50 mm, sobre o produto aplicado, pressionando com o peso de 2kg durante 30 segundos (importante assegurar que as arestas do peso coincidem com as arestas da peça, de modo a garantir a uniformidade da pressão). Após esta operação avaliar em termos de percentagem, a quantidade de produto em contato com a peça, em relação à sua área total. Repete-se o mesmo procedimento aos 10, 20 e 30 minutos. Após se ter classificado relativamente ao poder molhante, nos tempos acima referidos, descolar a peça de vidro e avaliar em termos de percentagem, a quantidade de produto que aderiu a peça, em relação à sua área total.

5.2.3.6. Deslizamento

A *EN1308:2007-Adhesives for tiles-Determination of slip* define a forma de medir o deslizamento de uma peça cerâmica colocada em posição vertical sobre uma camada de cimento cola. O método e equipamentos necessários são os apresentados na Fig. 15 e 16.



a) Talocha, peças cerâmicas de 20 kg/m² e 30kg/m², peso 5kg e cronómetro



b) Penteado

Figura 17 – Equipamentos e procedimento deslizamento

Sobre uma placa de betão e com o auxílio da parte lisa de uma talocha aplicar uma capa fina de produto de modo a humedecer toda a área em que vais ser aplicado o produto. Com a parte dentada da talocha, mantida num ângulo de cerca de 60° em relação ao suporte aplicar uma camada de produto.

c) Peça cerâmica 20kg/m²d) Peça cerâmica 20kg/m² com peso de 5kge) Peça cerâmica 30 kg/m²f) Peça cerâmica 30kg/m² com peso de 5kg

Figura 18 – Equipamentos e procedimento deslizamento

Esperar 2 minutos, colocar a peça cerâmica sobre o produto aplicado, pressionando o peso de (5 ± 0.01) kg, durante 30 segundos (importante assegurar que as arestas do peso coincidem com as arestas da peça, de modo a garantir a uniformidade da pressão). Marcar a zona de produto em contacto com a parte superior da peça, com o auxílio de um x-ato, traçando um “risco” ao longo da aresta superior. Colocar suavemente a placa de betão em posição vertical e após 18 minutos colocar a placa de betão na posição horizontal e marcar novamente com o auxílio do x-ato, a distância percorrida pela peça cerâmica.

O deslizamento da peça cerâmica mede-se pela distância em milímetros, entre as duas marcas efetuadas no produto aplicado.

5.2.4. Caracterização dos produtos endurecidos

5.2.4.1. Determinação da resistência á tração perpendicular (aderências)

A *EN 1348: Adhesives for tiles. Determination of tensile adhesion strength for cementitious adhesives*, a *EN 12004: Adhesives for tiles. Definitions and Specifications*, a *EN WI67072: Liquid waterproofing membranes* e a *EN 1015-12: Methods of test for mortar for masonry-Part 12: Determination of adhesive strength of hardened rendering and plastering mortars on substrates* definem os procedimentos para determinar a força por unidade de superfície necessária para descolar uma argamassa do suporte, aplicando uma força de tração perpendicular.

Os equipamentos necessários á preparação do ensaio e o procedimento apresenta-se de seguida:

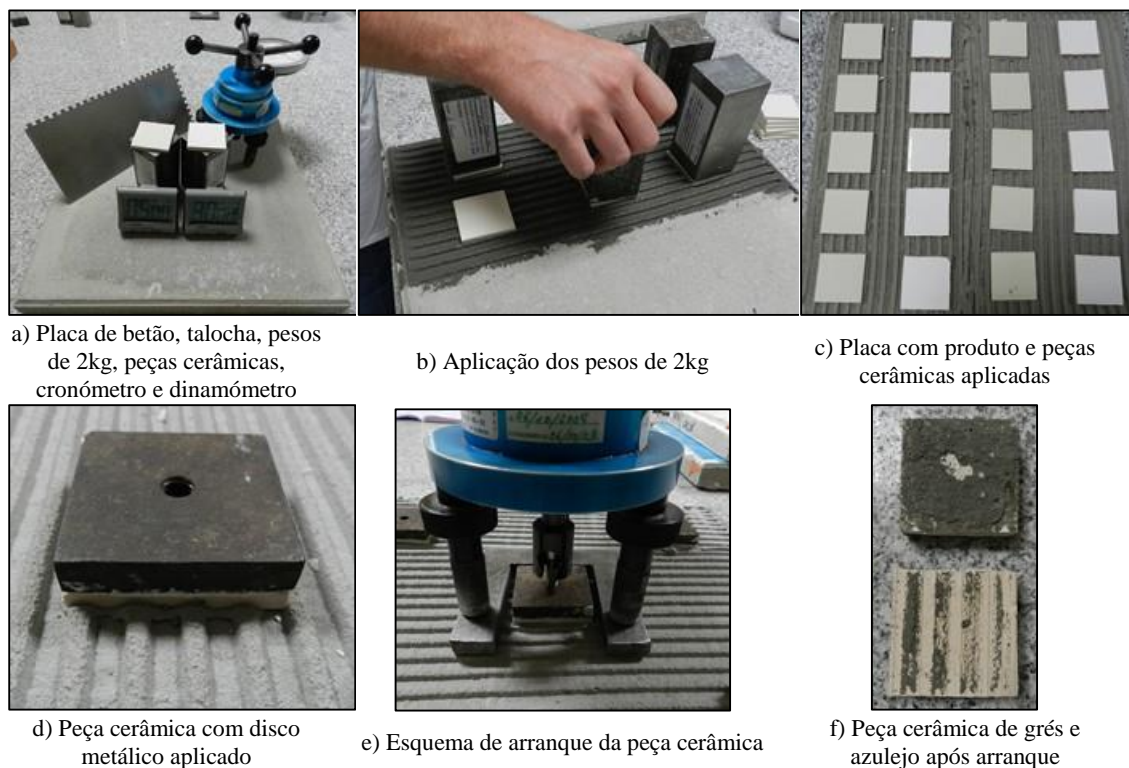


Figura 19 – Equipamentos e esquema representativo do procedimento

Com o auxílio da talocha lisa aplicar uma capa fina de produto sobre a placa de betão, de modo a humedecer toda a área em que vai ser aplicado o produto em teste.

Com a talocha dentada, mantida num ângulo de cerca de 60° em relação ao suporte, aplicar uma camada de produto.

Colocar o relógio em contagem para que se inicie o tempo de ensaio.

Após 5 min do início da contagem de tempo do ensaio colocar 5 peças cerâmicas (V1) sobre o produto aplicado, pressionando-as com o peso de 2 kg, durante 30 s (assegurar que as arestas do peso coincidem com as arestas da peça, de modo a garantir a uniformidade da pressão).

Colocar o conjunto na câmara climatizada nas condições de $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ e $50\pm 5\% \text{HR}$.

A realização deste ensaio constitui na obtenção de valores de aderência para as seguintes situações:

Aderências iniciais:

7dias – passados 6 dias de armazenamento na camara climática, colar os discos metálicos de tração às peças cerâmicas. Armazenar de novo na câmara e após 24h realizar o ensaio através do dinamômetro, arrancar as peças cerâmicas procurando exercer a força a uma velocidade constante de aproximadamente 250 ± 50 N/s.

14dias - passados 13 dias de armazenamento na camara climática, colar os discos metálicos de tração às peças cerâmicas. Armazenar de novo na câmara e após 24h realizar o ensaio através do dinamômetro, arrancar as peças cerâmicas procurando exercer a força a uma velocidade constante de aproximadamente 250 ± 50 N/s.

28dias - passados 27 dias de armazenamento na camara climática, colar os discos metálicos de tração às peças cerâmicas. Armazenar de novo na câmara e após 24h realizar o ensaio através do dinamômetro, arrancar as peças cerâmicas procurando exercer a força a uma velocidade constante de aproximadamente 250 ± 50 N/s.

Aderências depois de imersão em água - Passados 7 dias de armazenamento na câmara climática, submergir as placas em água à temperatura $23\pm 2^\circ\text{C}$. Passados 20 dias retirar as placas da água, secar as peças cerâmicas e colar-lhes os discos metálicos de tração. Passadas 7 horas submergir de novo as placas em água à mesma temperatura que anteriormente. Ao 28º dia retirar a placa da água e proceder imediatamente à medição da resistência à tração, da mesma forma que nas aderências iniciais.

Aderências depois de exposição ao calor - Passados 14 dias de armazenamento na câmara climática, colocar as placas numa estufa com circulação de ar a $70\pm 2^\circ\text{C}$. Ao fim de 14 dias retirar as placas da estufa e colar os discos metálicos de tração às peças cerâmicas. Armazenar as placas durante 24 horas na câmara climática e proceder à medição da resistência à tração, da mesma forma que nas aderências iniciais.

Aderências depois do tempo aberto - Neste ensaio, ao contrário dos anteriores, as peças cerâmicas (P1) não são aplicadas sobre o produto após 5 min do início da contagem

de tempo do ensaio. Na realização de alguns ensaios de produto fez-se TO aos 30 minutos, em outros ensaios fez-se também aos 10 minutos e 20 minutos. (Nota: as várias opções de tempo podem ser definidas em função do produto em análise). Passados 27 dias de armazenamento na câmara climática, colar os discos metálicos de tração às peças cerâmicas. Armazenar de novo na câmara e após 24h realizar o ensaio através do dinamômetro, arrancar as peças cerâmicas procurando exercer a força a uma velocidade constante de aproximadamente 250 ± 50 N/s.

Em relação aos resultados a aderência é dada em kg/cm^2 ou N/mm^2 pela seguinte equação: $\text{Aderência} = F/S$ em que F é a força de rutura em N e S é a área superfície de contato em cm^2 ou mm^2 . O resultado final para cada ensaio é a media dos cinco valores obtidos.

Após realização do ensaio de arrancamento e junto do valor obtido na aderência tem de se realizar a classificação da rotura de acordo com a *EN 12004 Adhesives for tiles. Definitions and Specification* onde vem:

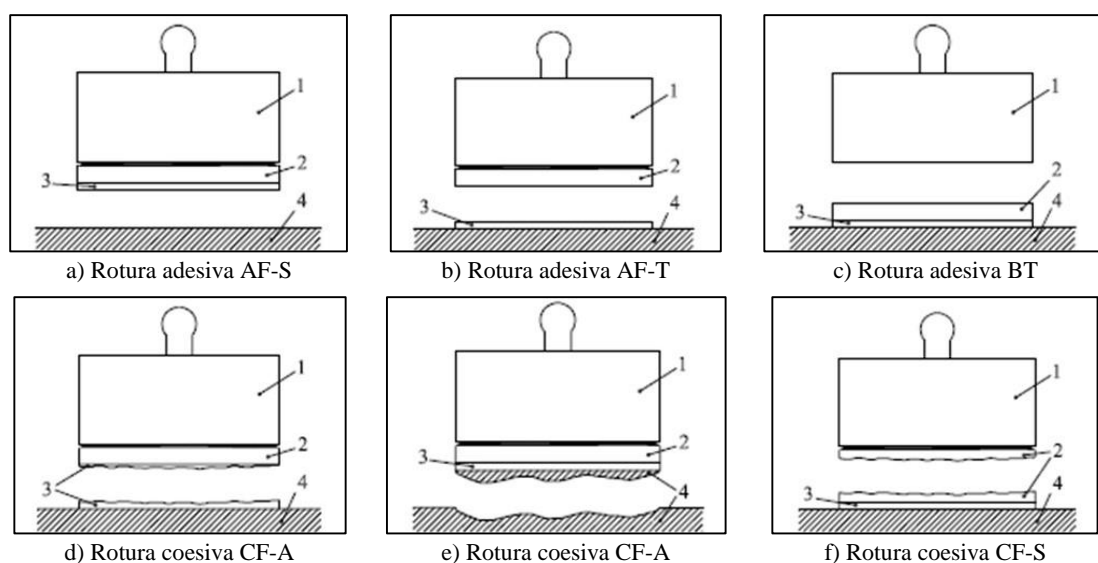


Figura 20 – (1-Acessório de tração; 2- Ladrilho; 3 – Argamassa cola; 4 – Suporte) Tipos de rotura

5.2.4.2. Deformação transversal

A *NP EN 12004:2008* prevê que as argamassas-cola possam ser classificadas, em termos de deformação transversal, em cimento-cola “deformável” e “altamente deformável” quando apresentam, respetivamente, valores entre 2,5-5,0mm e igual ou superior a 5,0mm. O método de ensaio é descrito na *EN 12002:2002* e tem por objetivo

definir a forma de determinar a deformabilidade de cimentos-cola através da medição da flecha de um provete de dimensões padrão, 300 ± 1 por 45 ± 1 mm e espessura $3 \pm 0,05$ mm, suportado nas duas extremidades, quando sujeito a uma força de flexão, aplicada ao centro.

A preparação do ensaio apresenta-se de seguida:



a) Moldes, peso, placa de alumínio, pincel com óleo e fita-cola



b) Molde oleado



c) Molde em mesa compactadora (70 pancadas)



d) Peso no molde 1h



e) Provetes dentro de saco plástico



f) Câmara climatizada nas condições de $23 \pm 2^\circ\text{C}$ e $50 \pm 5\% \text{HR}$

Figura 21 – Equipamento e esquema de procedimento de preparação do ensaio

Fixa-se a película de polietileno, ao suporte rígido, de forma a obter uma superfície plana sem dobras ou enrugamentos. De seguida, fixam-se ao conjunto anterior os moldes metálicos com dimensões internas de $280 \pm$ por $45 \pm$ mm e espessura 5 ± 1 mm e, com uma espátula, preenchem-se os orifícios dos moldes com o produto amassado. De modo a

compactar a amostra, fixa-se o conjunto à mesa compactador e aplicam-se 70 pancadas, posto isto, são retirados os moldes metálicos.

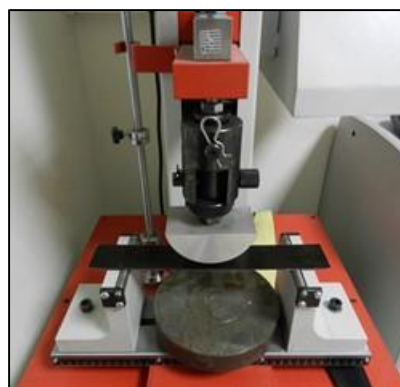
Posiciona-se os moldes de politetrafluoretileno de forma centrada sobre a argamassa de modo a obter-se provetes de dimensões 300 ± 1 por 45 ± 1 mm e espessura $3\pm 0,05$ mm, tendo o cuidado de antecipadamente se aplicar óleo descofrante para facilitar a sua posterior remoção. Colocam-se os pesos de secção 290×45 mm sobre os moldes, capazes de exercer uma força de 100 ± 1 N, de modo a garantir que o material preencha totalmente a cavidade do molde com a espessura requerida. Remove-se o excesso de material das laterais dos moldes e uma hora mais tarde retiram-se os pesos.

Após 48 horas, removem-se os moldes e colocam-se as amostras sobre o suporte, dentro do recipiente plástico, fechando-se de modo a torna-lo estanque. Em seguida coloca-se o conjunto na câmara climatizada em condições de $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ e $50\pm 5\%$ Hr

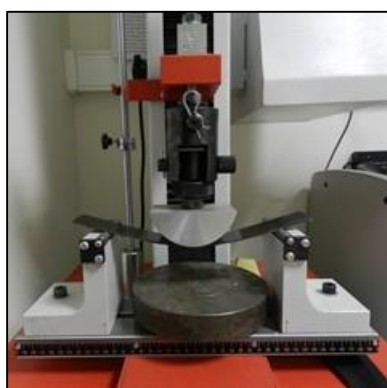
Após 12 dias remove-se o saco plástico e deixa-se as amostras por mais 14 dias na câmara. Após os 14 dias encontra-se finalizada a fase de preparação do ensaio e avança-se para a segunda fase que se trata da execução do ensaio.



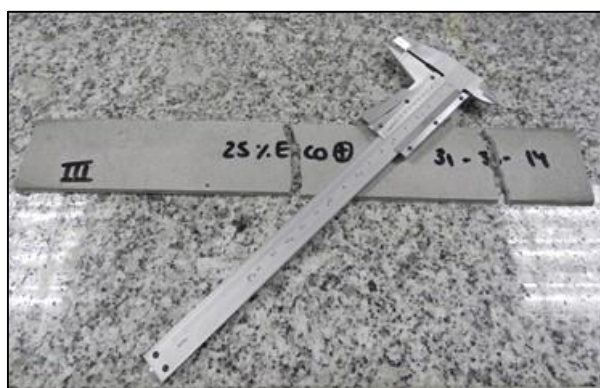
a) Equipamento de ensaios universal



b) Posição da tira no equipamento



c) Pormenor de deformação



d) Medição da tira com o Paquímetro

Figura 22 – Equipamento e esquema de ensaio

Decorridos os 14 dias, retiram-se as amostras do suporte, pesam-se e mede-se a sua espessura em 3 pontos, isto é, a meio e a $50\pm 1\text{mm}$ a partir de cada extremidade usando o paquímetro de precisão $0,05\text{mm}$. Se os 3 valores estiverem dentro da tolerância requerida $3,0\pm 0,1\text{mm}$ calcula-se o valor médio.

De seguida, colocam-se as amostras na máquina de deformação transversal que aplica uma carga transversal, a uma velocidade constante de 2mm/min , até que ocorra a rotura do provete medindo a deformação e a força máxima aplicada.

6. Apresentação e discussão dos resultados

6.1. Caracterização das escórias de alto-forno

6.1.1. Ensaio de caracterização

6.1.1.1. Análise granulométrica

A tabela 5 apresenta os resultados de caracterização granulométrica pela utilização correta de malhas adaptadas para a caracterização de matérias – primas segundo os procedimentos da empresa.

Tabela 5 – Análise granulométrica

Abertura dos peneiros	Escória E		Escória EP	
	Material retido	% Acumulada	Material retido	% Acumulada
630 μm	0	0	0	0
315 μm	0	0	0	0
160 μm	0.1	0.1	0	0
80 μm	1.4	1.5	5.1	5.1
Fundo	98.5	100	94.9	100

Pela análise granulométrica efetuada a cada tipo de escória E e EP pode-se concluir que até 80 μm a escória E apresenta-se como a mais fina que a escória EP. No entanto, este resultado é pouco informativo no sentido em que o comportamento destes materiais entre o 0 e 80 μm é mais relevante para a avaliação de potencial de reatividade. Assim, ainda que a metodologia apresentada possa ser usada pela empresa, para efeitos de controlo de qualidade, recomenda-se uma avaliação mais adequada de reatividade por recorrer a equipamentos mais sensíveis, conforme indicado na secção 6.1.1.5.

6.1.1.2. Difração de Raios - X

Na figura 23 apresenta-se os difractogramas de difração de raios X obtidos para os dois tipos de escória em estudo, E e EP (dos materiais resultantes do mesmo processo industrial, mas em diferentes fases).

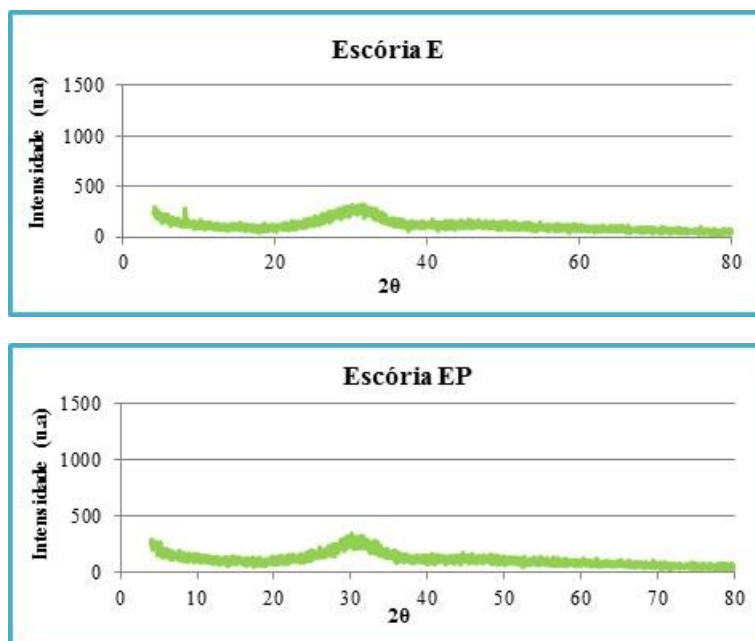


Figura 23 – Difractogramas de raios X

Observando os resultados obtidos conclui-se que o material analisado é considerado uma substância essencialmente amorfa. Não se verificam quaisquer picos cristalinos.

Esta avaliação é fundamental para o estudo em causa, pois se a escória se apresenta como uma substância amorfa, então é potencialmente reativa e, por isso, pode ser utilizada como um bom ligante em conjunto com o cimento.

6.1.1.3. Método de BET

Os resultados obtidos para os dois tipos de escória em estudo bem como alguns valores de referência (*Portland Cement Association*) encontram-se na tabela seguinte:

Tabela 6 – Valores de área superficial específica

	BET_{N2} (m²/g)
Escória E	1,75
Escória EP	3,29
<i>Cimento Portland</i>	5,00*
<i>Fumo de sílica</i>	18,00**
<i>Metacaulinos</i>	20.00***

* Valores de referência do cimento Portland por BET (Odler, 2003)

** (Bhanja and Sengupta, 2005)

*** (Rocha, 2005)

A determinação da área superficial específica é necessária pois um valor de área superficial específica baixo indica-nos que as partículas são mais grossas e, potencialmente menos reativos. Em relação aos resultados obtidos, pelo método de BET, as escórias apresentam-se próximos do cimento Portland, particularmente a EP. Ainda assim, a em comparação com outras pozolanas como fumo de sílica e Metacaulinos, a sua área superficial é substancialmente inferior.

6.1.1.4. Análises Térmicas (ATD/TG)

Desde logo deve indicar-se que o equipamento utilizado é usualmente destinado para realizar medições a elevadas temperaturas pelo que possui uma sensibilidade reduzida a baixas temperaturas. Por isso, a parte inicial das curvas de variação térmica diferencial é ignorada, uma vez que não revela o comportamento correto do material.

A Figura 24 apresenta os resultados obtidos para os dois tipos de escória em estudo.

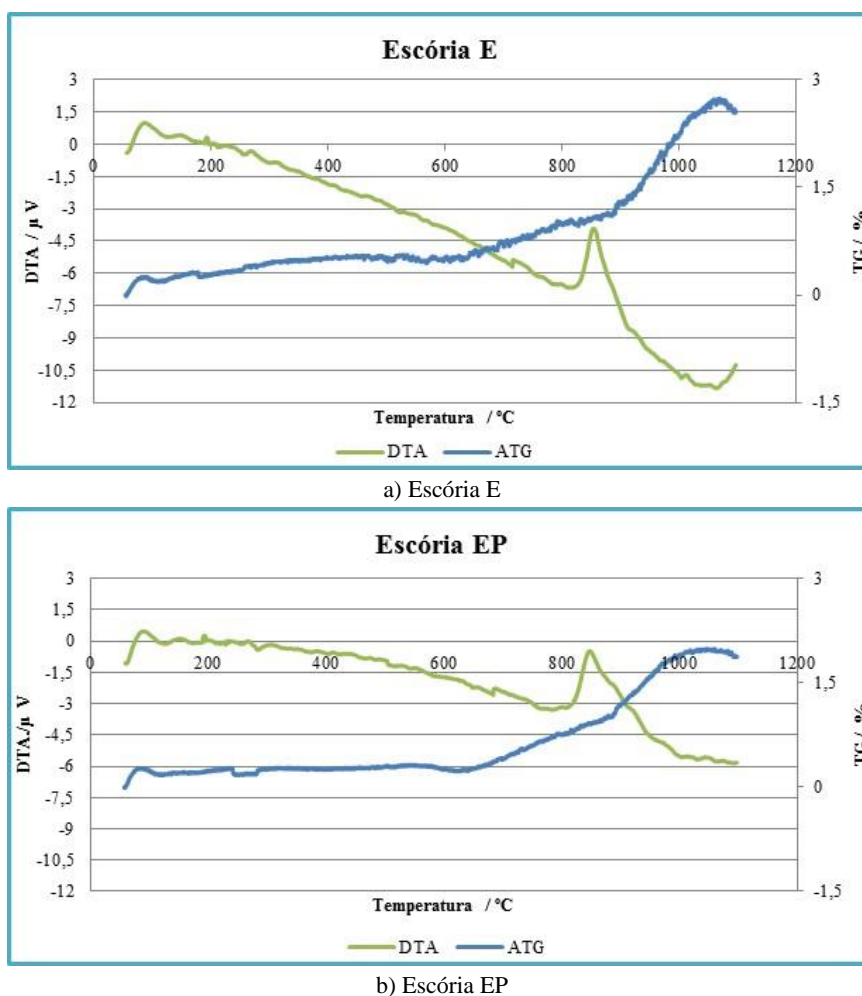


Figura 24 – Análise térmica diferencial e gravimétrica

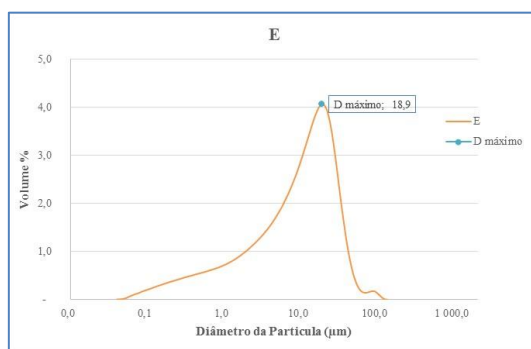
Analisando atentamente os resultados obtidos verifica-se que as curvas ATD/TG são bastante semelhantes nos dois tipos de escória em análise. Verifica-se que ocorre uma perda de massa próxima dos 100°C que está associada à perda de água adsorvida. A formação de novas fases cristalinas surge aos 900°C, associadas a cristalizações de alguns componentes a partir dos elementos presentes na escória como, por exemplo, carbonatos. A perda de massa total é aproximadamente 3% na escória E e 2% na escória EP.

6.1.1.5. Distribuição do tamanho de partícula

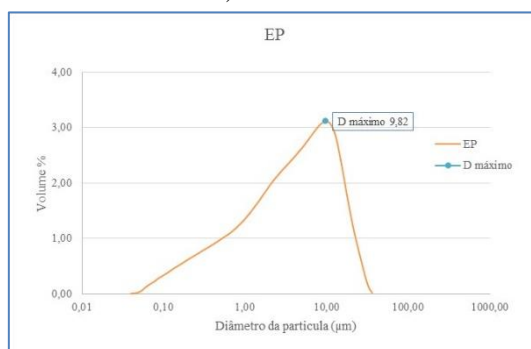
A Figura 25 apresenta os gráficos obtidos a partir da medição realizada no equipamento Beckman Coulter LS 230.

A distribuição do tamanho da partícula da escória E oscila entre 2 e 100µm e EP apresenta um intervalo menos alargado sendo este entre 0.1 e 40µm. O diâmetro médio das partículas de E é de 14µm e nas partículas de EP é de 6.34µm.

Em cada gráfico está representado o diâmetro máximo medido em cada uma das escórias estudadas.



a) Escória E



b) Escória EP

Figura 25 – Distribuição do tamanho de partícula das escórias

Analisando os resultados obtidos pode concluir-se que a escória EP tem partículas mais finas que a escória E, o que vai de encontro aos resultados obtidos pelo método de BET, que apresenta a escória EP com uma área superficial específica superior a E, pelo que as suas partículas deverão ter diâmetro inferior.

6.1.2. Ensaio de reatividade

A avaliação da reatividade pozolânica consistiu, essencialmente, na realização de ensaios mecânicos em diferentes condições de cura. Neste estudo, as misturas utilizadas foram as seguintes:

- 2800g de areia siliciosa + 700g de cal + 700g de escória de alto-forno E
- 2800g de areia siliciosa + 700g de cal + 700g de escória de alto-forno EP

Como variável adicional, optou-se por introduzir nas formulações o ativador alcalino (silicato de sódio) de forma a evidenciar potenciais de reatividade dos materiais escolhidos. Para o efeito, prepararam-se novas misturas com a adição de 0,5% (percentagem em massa) dessa base forte. Avalia-se o efeito do ativador e comparam-se resultados entre várias situações, principalmente ao nível das resistências mecânicas iniciais.

A tabela 7 apresenta as águas de amassadura adotadas para as formulações em estudo.

Tabela 7 – Resultados dos produtos em pasta com e sem base forte

<i>Reatividade Pozolânica</i>	<i>Sem base forte</i>	<i>Com base forte</i>
	<i>% Água</i>	<i>% Água</i>
Escória de alto – forno E	21.5%	21.5%
Escória de alto-forno EP	24%	26%

A caracterização dos produtos endurecidos seguiu os métodos de ensaio descritos no ponto **5.2.1.5**, essencialmente foram realizados ensaios para a determinação da resistência à flexão e à compressão.

Resistência à flexão

Na figura 26 apresentam-se os resultados dos ensaios de resistência à flexão das amostras, com e sem base forte, para condições de cura seca e cura húmida.

Os provetes apenas foram colocados em imersão após 3 dias, devido à sua instabilidade quando imersos em água. Assim, só foi possível obter valores de resistência a partir dos 3 dias.

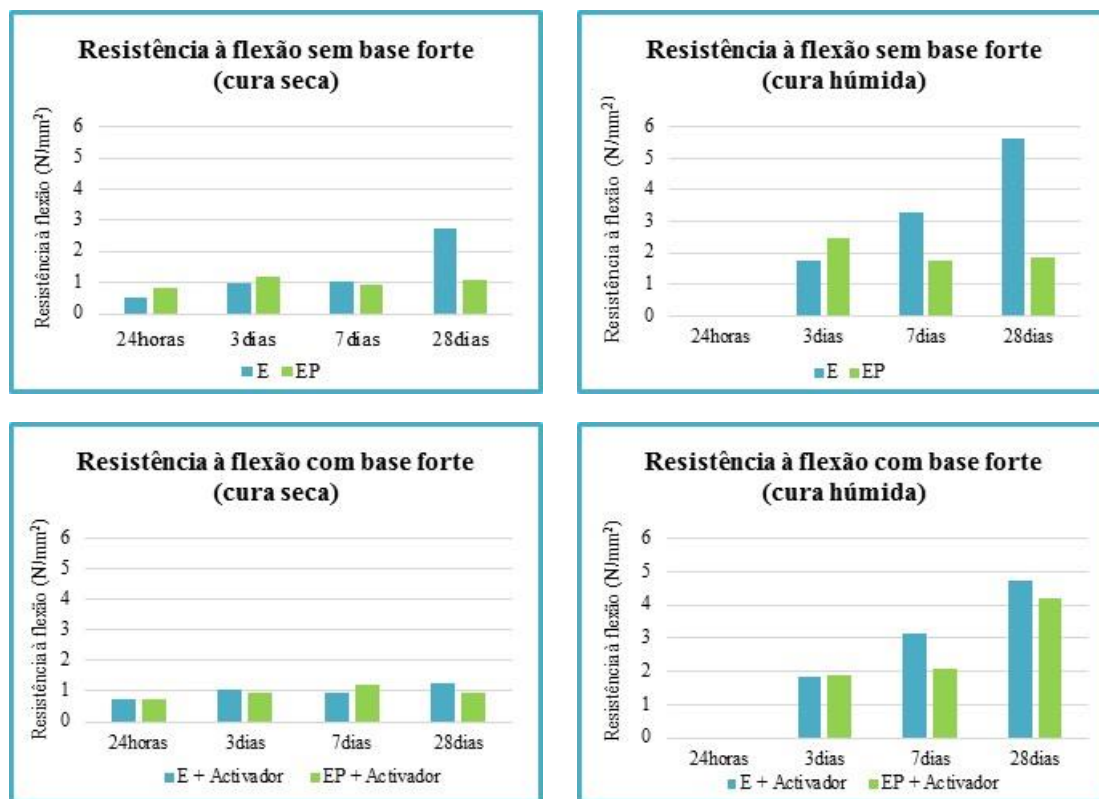


Figura 26 – Resultados de resistência à flexão com e sem base forte para diferentes condições de cura

Analisando os resultados acima apresentados pode-se verificar que não existem diferenças significativas de E para EP. Realizando a comparação dos resultados para cura seca, com e sem base forte, não se verifica alteração quando se acrescenta a base forte. Porém no caso E, sem base forte, aos 28 dias, tem-se um resultado superior de resistência à flexão. Observando os gráficos de resultados de resistência à flexão para cura húmida, com e sem base forte, para E não se verifica qualquer alteração quando se acrescenta a base forte. Para EP, com base forte, aos 28 dias, verifica-se um aumento substancial da resistência à flexão.

Interpretando os resultados obtidos e comparando cura seca vs cura húmida obteve-se valores de resistência à flexão em cura húmida são tendencialmente superiores aos valores em cura seca para *E*, *EP*, *E+ativador* e *EP+ativador*.

Resistência à compressão

Na figura 27 apresentam-se os resultados dos ensaios de resistência à compressão das amostras com e sem base forte, para condições de cura seca e cura húmida.

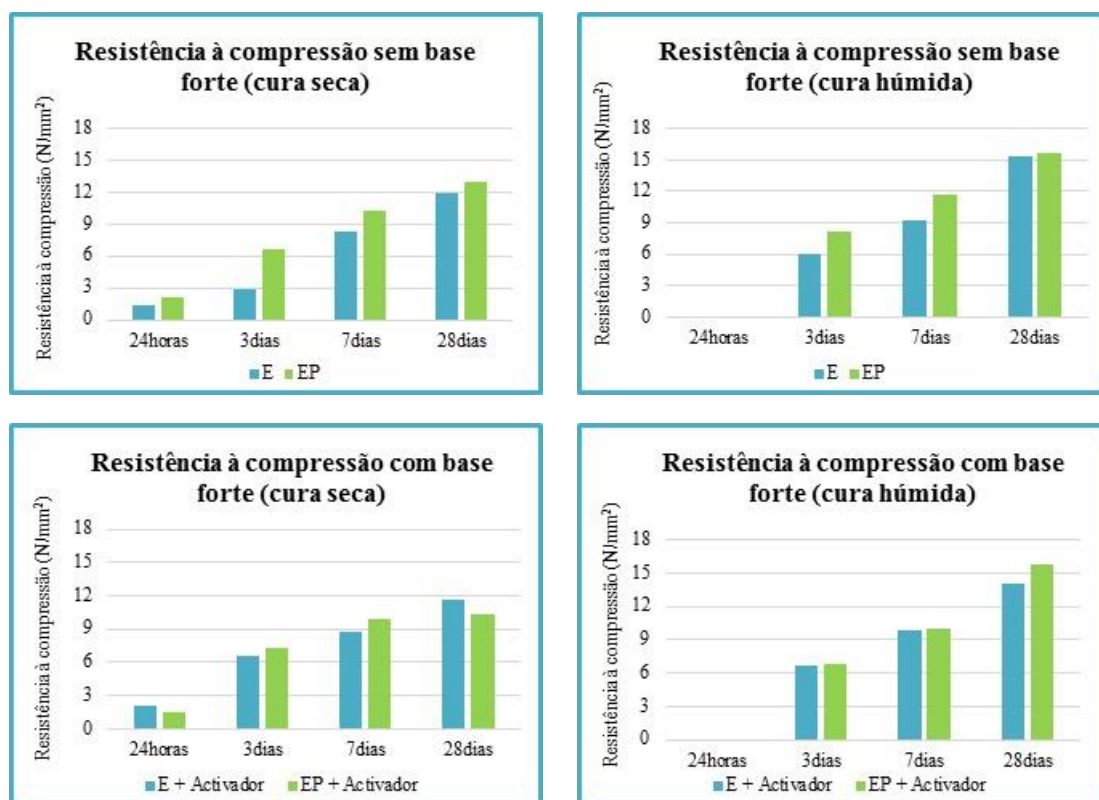


Figura 27 – Resultados de resistência à compressão com e sem base forte para diferentes condições de cura

Também neste caso, observam-se valores de compressão tendencialmente superiores em condições de cura húmida, embora não seja tão evidente quanto observado no caso da resistência à flexão.

Na maioria dos casos, sem adição de base forte, notam-se valores superiores para as formulações com adição de escória EP, eventualmente como resultado de maior compacidade, já que o material é mais fino. Por outro lado, a adição de base forte tende a conduzir a uma maior proximidade de valores entre as formulações com E e EP, eventualmente, por permitir alguma correção de menor reatividade inicial de escória E.

Relacionando estes resultados com os equivalentes à resistência à flexão, admite-se que a metodologia apresentada, com ou sem base forte, não é suficientemente capaz de assegurar distinção entre as duas escórias apresentadas, conforme seria esperado pelos resultados obtidos relativos à área superficial e ao grau de finura.

Ainda assim, a metodologia confirma o potencial reativo para as duas escórias apresentadas, pelo que ambas serão introduzidas na formulação de argamassa-cola, em quantidades dependentes das propriedades apresentadas e do seu custo de mercado.

6.2.Avaliação do impacto na substituição parcial de cimento Portland por escória de alto-forno

Para o estudo da substituição parcial de cimento por escória de alto-forno foram reformuladas argamassas-cola onde se pretende avaliar o efeito da escória em combinação com o cimento. Procedeu-se à reformulação de um cimento cola do tipo C1 e outro do tipo C2.

Tendo em consideração o potencial pozolânico apresentado em 6.1.2, prevê-se uma grande possibilidade de redução de cimento por substituição pela pozolana/escória E, considerando a sua disponibilidade superior no mercado e o seu custo inferior.

6.2.1. Substituição em cimento-cola do tipo C1

Corresponde a CCP.01, CCP.02 e CCP.03 uma concentração de 10%, 25% e 50% respetivamente, de substituição de cimento Portland por escória. CCP.00 é a formulação padrão a partir da qual se procedeu às referidas substituições.

Na tabela 8 apresentam-se as percentagens em massa de cada componente utilizado no desenvolvimento das formulações. Todos os componentes são fixos, com a exceção da relação cimento e escória.

Tabela 8 – Formulações com diferentes percentagens de cimento e introdução de escória de alto -forno

		Hipóteses			
		CCP.00	CCP.01	CCP.02	CCP.03
Componentes	Cim. Cz II 42,5 (OPC)	35.0%	31.5%	26.5%	17.5%
	Escória de alto-forno E/EP	0.00	3.50%	8.50%	17.50%
	Areia siliciosa	52.87%	52.87%	52.87%	52.87%
	Éter de celulose	0.30%	0.30%	0.30%	0.30%
	Éter de amido	0.03%	0.03%	0.03%	0.03%
	Polímero redispersável	1.30%	1.30%	1.30%	1.30%
	Filler	10.00%	10.00%	10.00%	10.0%
	Regulador de tempo de presa	0.50%	0.50%	0.50%	0.50%

CCPE – com escória E e CCPEP – com escória EP

As formulações desenvolvidas foram caracterizadas como produto em pasta, que consistiu na determinação da percentagem de água do amassado, da massa volúmica aparente, do tempo de presa e capacidade de poder molhante e transferência conforme os métodos de ensaio descritos anteriormente. Os resultados obtidos apresentam-se na tabela 9.

Tabela 9 - Resultados dos produtos em pasta de argamassas com diferentes percentagens de cimento e introdução de escória de alto - forno

		Hipóteses			
		CCP.00	CCP.01	CCP.02	CCP.03
% Água		24.0%	23.0%	23,5%	23.0%
$\rho_{pó}$		1,24	1,26	1,25	1,26
ρ_{pasta}		1,52	1,61	1,63	1,61
Tempo de presa	Início (h)	6h30	8h00	6h00	7h45
	Fim (h)	8h00	9h00	8h15	9h45
Poder Molhante	20'	90%	100%	95%	95%
	30'	90%	100%	85%	90%
Transferência	20'	85%	95%	85%	85%
	30'	80%	95%	20%	20%

Como se pode observar pelos resultados obtidos não existem diferenças significativas entre a formulação base (CCP.00) e as formulações com substituição parcial de cimento, com exceção da transferência após 30', onde se observa uma diminuição com maior introdução de escória.

Posteriormente, as argamassas foram caracterizadas como produtos endurecidos através da determinação à tração perpendicular. Os resultados para as condições iniciais apresentam-se nos gráficos da Figura 28

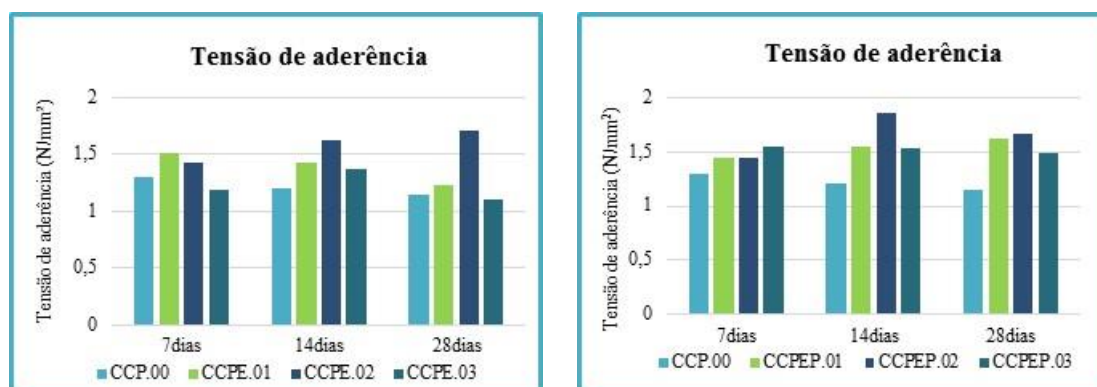


Figura 28 – Tensões de aderência para as várias condições em avaliação

Os resultados para as condições de imersão, calor e tempo aberto apresentam-se nos gráficos da Figura 29

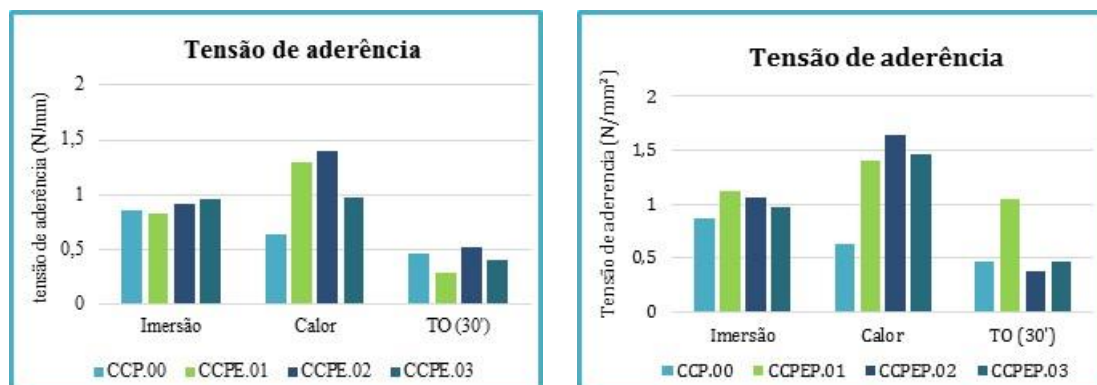
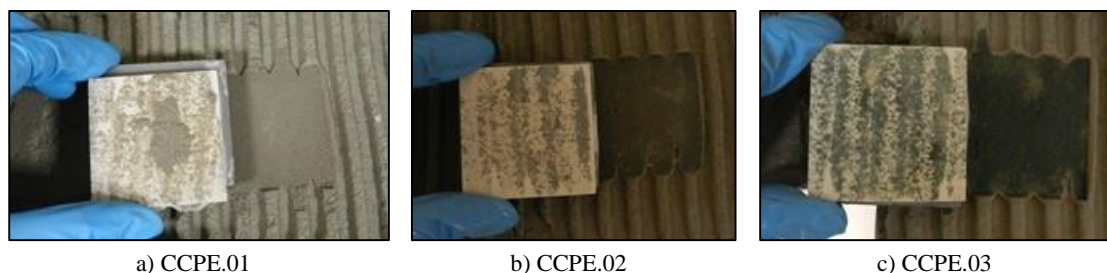


Figura 29 - Tensões de aderência para as várias condições em avaliação

Pela análise dos gráficos não é possível afirmar que existe uma argamassa com resultados superiores, pois os resultados obtidos são muito semelhantes, com valores próximos para cada uma das condições de cura. Comparando os resultados das argamassas com substituição (CCPE.x e CCPEP.x) com a argamassa base (CPP.00) pode afirmar-se que houve uma otimização dos resultados pois em todas as condições de cura, exceto tempo aberto, os resultados das argamassas com substituição foram superiores aos da argamassa base. Em relação aos valores de tempo aberto estes estão prejudicados o que já era visível ao nível dos resultados do poder molhante e transferência.

A introdução de escória de alto-forno proporciona às misturas um odor forte (“podre”) nas formulações com maior percentagem de escória, especialmente em condições de imersão, especialmente quando se adiciona quantidades superiores a 17.5%.

As ruturas observadas para as condições iniciais (7, 14 e 28 dias) são ruturas adesivas entre o cerâmico e a cola (AF-T). Nas condições após imersão em água, os modos de rotura observados são, maioritariamente, coesivos pela cola (CF-A). Nestas condições, é ainda possível verificar uma alteração de cor parte das argamassas (para verde azulado), alteração essa que se intensifica à medida que aumenta a percentagem de escória. [Figura 30]



a) CCPE.01

b) CCPE.02

c) CCPE.03

Figura 30 – Aspeto após imersão em água

Os valores de tensão de aderência obtidos encontram-se acima do que a norma EN 12004 indica como requisito mínimo ($\geq 0,5 \text{ N/mm}^2$), o que reflete argamassa com potencial de desenvolvimento.

Os resultados obtidos no ensaio de deformação transversal são apresentados na tabela 10 e na Figura 31 (que representa o gráfico força/deformação) e não revela alterações significativas pela introdução de escórias.

Tabela 10 – Apresentação dos parâmetros força (N) e deformação (mm) obtidos a partir do ensaio de deformação transversal

	CCPE.01	CCPEP.01	CCPE.02	CCPEP.02	CCPE.03	CCPEP.03
Força (N)	10,3	10,6	7,0	10,0	10,0	7,1
Deformação (mm)	1,5	1,5	1,1	1,5	1,9	1,3

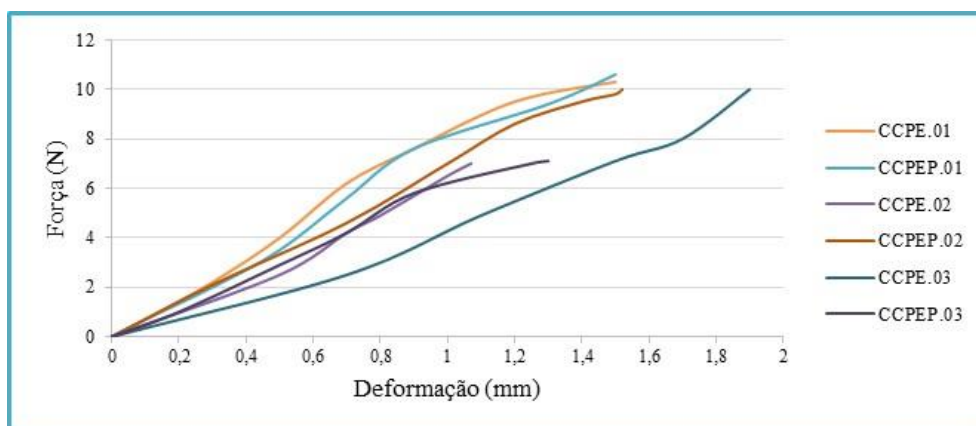


Figura 31 – Resultados da deformação transversal

6.2.2. Substituição em cimento do tipo C2

Na tabela 10 apresentam-se as percentagens em massa de cada componente utilizado no desenvolvimento das formulações.

Tabela 11 - Formulações com diferentes percentagens de cimento e introdução de escória de alto -forno

		Hipóteses			
		CFL.00	CFL.01	CFL.02	CFL.03
Componentes	Areia siliciosa	34.78%	34.78%	34.78%	34.78%
	Areia (0,5 – 1,2 mm)	13.00%	13.00%	13.00%	13.00%
	Cimento Cinza Tipo I 42,5	45.00%	40.50%	33.75%	22.50%
	Escória de alto-forno (E/EP)	0.00%	4.50%	11.25%	22.50%
	Polímero redispersável	5.00%	5.00%	5.00%	5.00%
	Fibra de celulose	0.57%	0.57%	0.57%	0.57%
	Éter de celulose	0.46%	0.46%	0.46%	0.46%
	Bentonita	0.30%	0.30%	0.30%	0.30%
	Regulador de tempo de presa	0.80%	0.80%	0.80%	0.80%
	Éter de amido	0.03%	0.03%	0.03%	0.03%
	Redutor de crómio	0.05%	0.05%	0.05%	0.05%

Aplicando a mesma metodologia que em **6.2.1**, substitui-se cimento por escória E em diferentes quantidades correspondendo a CFL.01, CFL.02 e CFL.03 uma concentração de 10%, 25% e 50% respetivamente. CFL.00 é a formulação padrão a partir da qual se procedeu às referidas substituições. Numa primeira fase desenvolveram-se as hipóteses CFL.01, CFL.02 e CFL.03.

Os resultados obtidos, relativamente a propriedades em pasta, apresentam-se na tabela 11.

Tabela 12 - Resultados dos produtos em pasta de argamassas com diferentes percentagens de cimento e introdução de escória de alto - forno

		Hipóteses			
		CFL.00	CFL.01	CFL.02	CFL.03
% Água		29.5%	29.0%	28.5%	28.0%
$\rho_{\text{pó}}$		1.24	1.20	1.18	1.19
ρ_{pasta}		1.40	1.36	1.41	1.39
Tempo de presa	Início	7h45	>24h	Sem resultado	Sem resultado
	Fim	11h30			
Poder Molhante	20'	100%	100%	100%	100%
	30'	100%	100%	95%	95%
Transferência	20'	100%	100%	95%	100%
	30'	95%	95%	85%	85%

Analisando os resultados obtidos pode observar-se que não existem diferenças significativas entre a mistura padrão e as misturas com substituição parcial de cimento por escória, para os valores de densidades (pó e pasta). A adição de escória de alto-forno prejudica um pouco os resultados do poder molhante e transferência, mas menos pronunciado que no caso do cimento – cola C1.

No entanto, os valores de tempo de presa, tem-se para CFL.00 a presa máxima às 11h30 e para as hipóteses com substituição, a presa não é alcançada, estando a pasta mole após 24h. Por isso, a partir do caso CFL.02, numa revisão da formulação, decidiu-se testar a redução do éter de celulose, de 0.46% para 0.3%. Os resultados da reformulação CFL.03 encontram-se na tabela seguinte:

Tabela 13 – Resultados para redução da % de éter de celulose (0.30%)

		Hipóteses			
		CFL.00	CFL.01	CFL.02	CFL.03
Tempo de presa	Início	-	11h15	10h00	10h45
	Fim	-	12h30	11h30	11h00

Como se pode verificar, a redução do éter de celulose diminui significativamente o tempo de presa, conforme esperado.

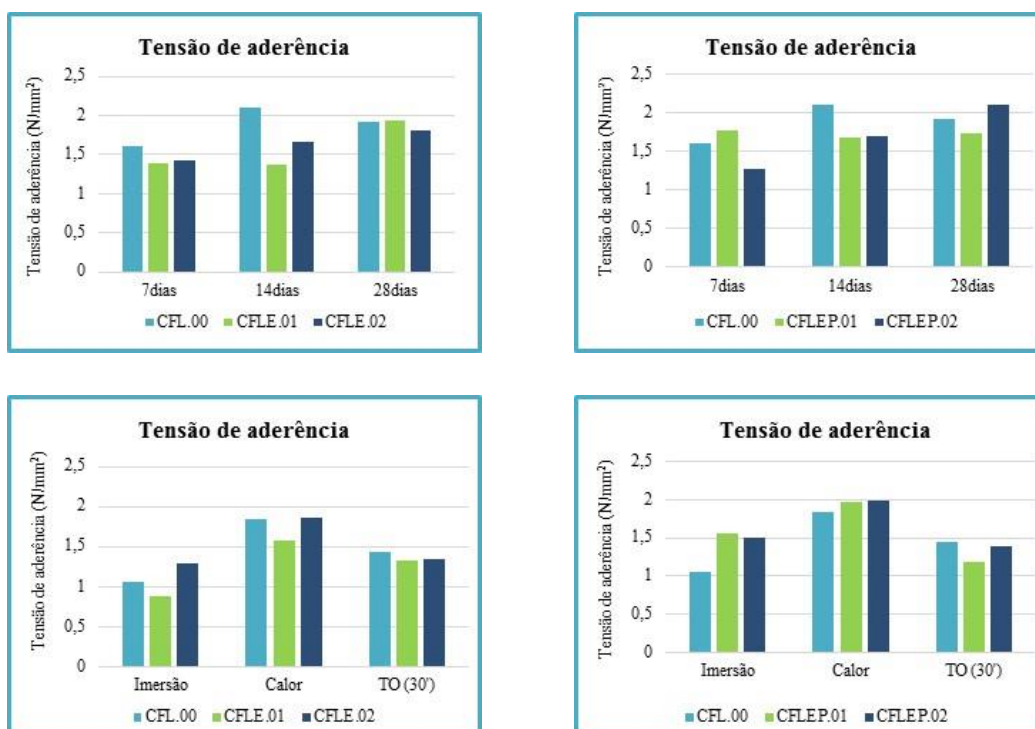
Adicionalmente para a hipótese CFL.03, além da redução do éter de celulose, acrescentou-se sulfato de cobre tentando minimizar a alteração da cor, devido ao que se verificou nas hipóteses estudadas em 6.2.1, finalmente adicionou-se uma máscara de odor, para minimizar o odor, especialmente em imersão, que se intensifica à medida que se aumenta a adição de escória de alto-forno.

Realizou-se uma nova avaliação dos parâmetros densidade, poder molhante e transferência, para verificar se as mesmas não ficam prejudicadas após as alterações feitas. Os resultados são apresentados na tabela 14 que apresenta uma diminuição significativa do poder molhante e transferência após 30'.

Tabela 14 – Resultados CFL.03 com 0.3% de éter de celulose

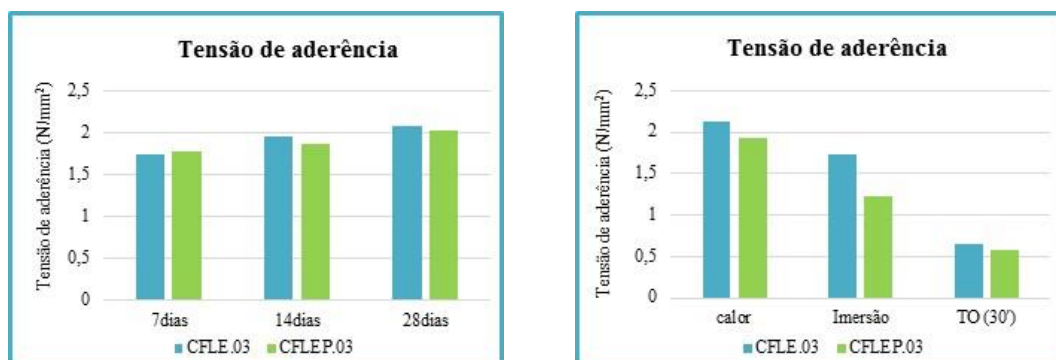
		CFL.03
%água		25%
ρ_{pasta}		1.51
Poder Molhante	20'	90%
	30'	90%
Transferência	20'	30%
	30'	0%

Na figura 32 a) e b) são apresentados os gráficos das tensões de aderência para todos os casos apresentados anteriormente.



a) Hipóteses com 0.46% de éter de celulose

Figura 32 – Tensões de aderência para as várias condições estudadas



Hipótese com 0.3% de éter de celulose, sulfato de cobre e máscara de odor

Figura 33 - Tensões de aderência para as várias condições estudadas

Como já referido anteriormente, diminui-se a quantidade de éter de celulose devido à verificação de tempos de presa excessivos, quando se substitui o cimento pela escória de alto-forno. Esta alteração, porém, condiciona de forma significativa o tempo aberto após 30'.

A introdução da máscara de odor não afetou nenhum dos parâmetros e revelou-se eficaz, podendo ser introduzido nos cimentos com estas características e numa percentagem de apenas 0,01%.

Analizando os resultados apresentados na Fig.31.a), relativamente às roturas obtidas para as condições iniciais (7, 14 e 28 dias), verificaram-se roturas coesivas pela cola (CF-A), também roturas coesivas pela cola (CF-A) para as condições de calor e imersão, não se verificando o mesmo para tempo aberto que apresentou roturas adesivas entre o cerâmico e a cola (AF-T).

Relativamente às roturas iniciais (7, 14 e 28 dias) e de imersão, da hipótese CFL.03, obteve-se principalmente roturas coesivas pela cola (CF-A). Em condições de calor obteve-se roturas 50% coesivas pela cola 50% adesivas entre o cerâmico e a cola (AF-T) e totalmente adesivas entre o cerâmico e a cola para condições de tempo aberto.

Os valores de tensão de aderência obtidos encontram-se acima do que a norma EN 12004 indica como requisito mínimo ($\geq 1.0 \text{ N/mm}^2$), o que reflete argamassa com potencial de desenvolvimento.

A Figura 34 apresenta a variação da cor nas hipóteses estudadas e é de salientar que a hipótese CFL.03 já com introdução do sulfato de cobre (0.2%) não apresenta melhorias em relação às outras, pelo que este componente pode ser dispensável.

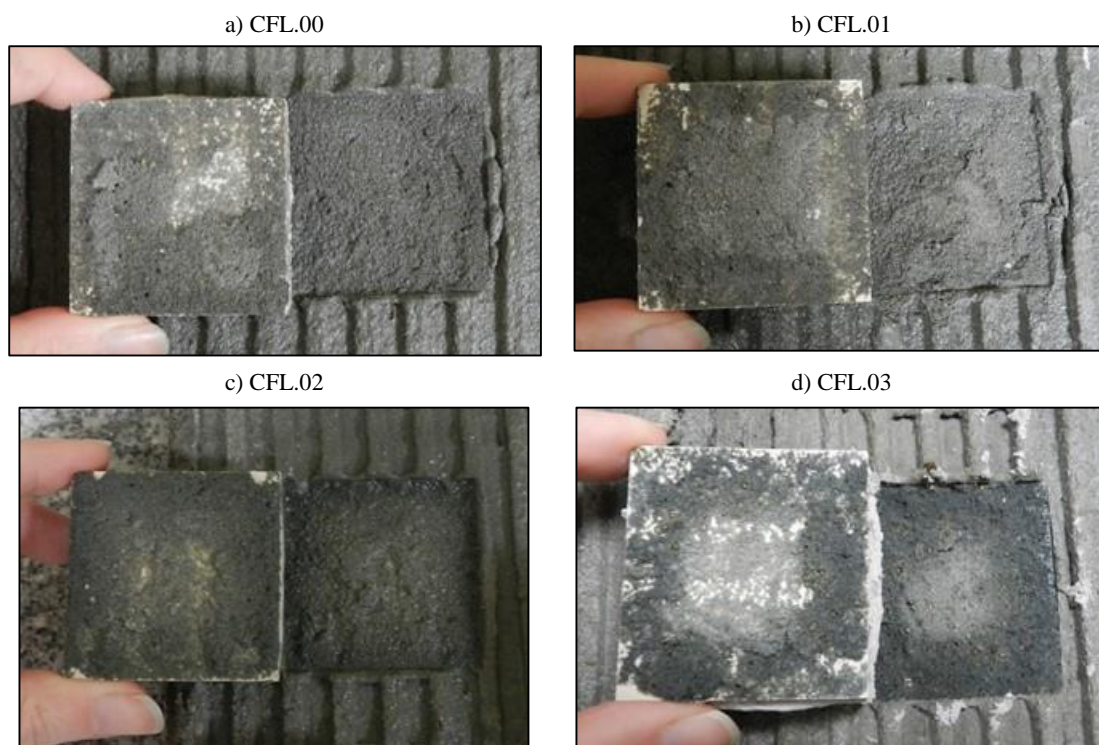


Figura 34 – Aspeto das argamassas após imersão

Os resultados obtidos no ensaio de deformação transversal são apresentados na tabela 15 e na figura 35 (que representa o gráfico força/deformação). Novamente, a adição de escória E não limita esta propriedade.

Tabela 15 - Apresentação dos parâmetros força (N) e deformação (mm) obtidos a partir do ensaio de deformação transversal

	CFLE.01	CFLEP.01	CFLE.02	CFLEP.02	CFLE.03	CFLEP.03
Força (N)	10.0	7.0	10.0	8.0	14.0	14.0
Deformação (mm)	2.0	2.1	2.1	2.2	1.8	2.0

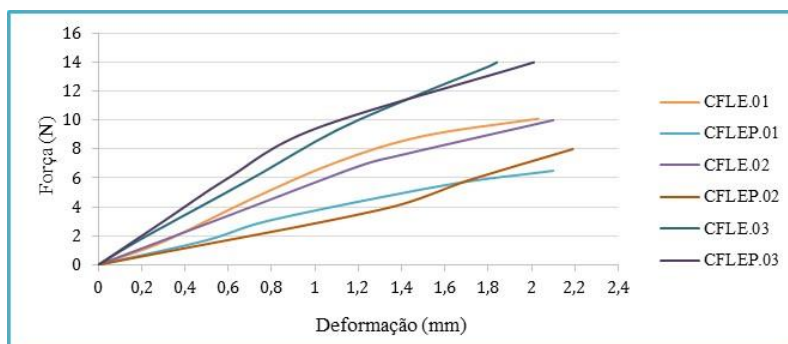


Figura 35 - Resultados da deformação transversal

6.3. Desenvolvimento de formulações com Escória de alto-forno como ligante principal

Após a avaliação do comportamento das argamassas de cimento, e avaliação do impacto da substituição de cimento Portland por escória de alto-forno, avança-se para a última fase do trabalho experimental. Neste último tópico pretende-se estudar o comportamento das argamassas - cola de cimento, em que o cimento é componente secundário, substituído por escória de alto-forno, ou seja, a escória assume o papel de ligante principal. Tal como em 6.2. estudaram-se formulações para duas classes de cimento, C1 e C2.

Para os dois casos, as opções de formulações apresentadas são o resultado de discussões internas do grupo Saint – Gobain e já se apresentam como o culminar de trabalhos prévios realizados.

6.3.1. Formulações do tipo C1

Na tabela 16 apresentam-se as percentagens em massa de cada componente utilizado no desenvolvimento das formulações.

Tabela 16- Formulações com diferentes percentagens de cimento e introdução de escória de alto -forno

	Hipóteses		
	C1.01 a)	C1.01 b)	C1.01 c)
Cim. Cz I 42,5 (OPC)	10.00%	10.00%	-
Escória E	10.00%	10.00%	40.00%
Escória EP	-	-	10.00%
Cinzas volantes	5.00%	5.00%	-
Supracem 45	-	-	4.90%
Gesso Hemi hidratado	-	-	1.00%
Areia Siliciosa	73.70%	72.60%	71.30%
Éter de Celulose	0.30%	0.30%	0.30%
Polímero redispersável	1.00%	1.00%	3.50%
Carbonato de lítio	-	0.10%	-
Cimento aluminoso	-	1.00%	-

As formulações desenvolvidas foram caracterizadas como produto em pasta. Esta caracterização consistiu na determinação da percentagem de água do amassado, da massa volumica aparente, do tempo de presa e capacidade de poder molhante e transferência conforme os métodos de ensaio descritos anteriormente. Os resultados obtidos apresentam-se na tabela 17.

Tabela 17 - Resultados dos produtos em pasta de argamassas com diferentes percentagens de escória de alto - forno

		Hipóteses		
		C1.01 a)	C1.01 b)	C1.01 c)
% Água		21%	21%	26%
ρ_{pasta}		1.39	1.38	1.43
Tempo de presa	Início (h)	>24h	>24h	$\pm 24h$
	Fim (h)			
Poder Molhante	5'	-	-	100%
	10'	-	-	90%
	20'	90%	90%	70%
	30'	85%	85%	50%
Transferência	5'	-	-	100%
	10'	-	-	90%
	20'	60%	40%	30%
	30'	60%	60%	0%

Analisando os resultados obtidos verifica-se dificuldades ao nível da presa para as três hipóteses. Também se verifica uma diminuição significativa do poder molhante e transferência.

Na figura 36 são apresentados os gráficos das tensões de aderência:

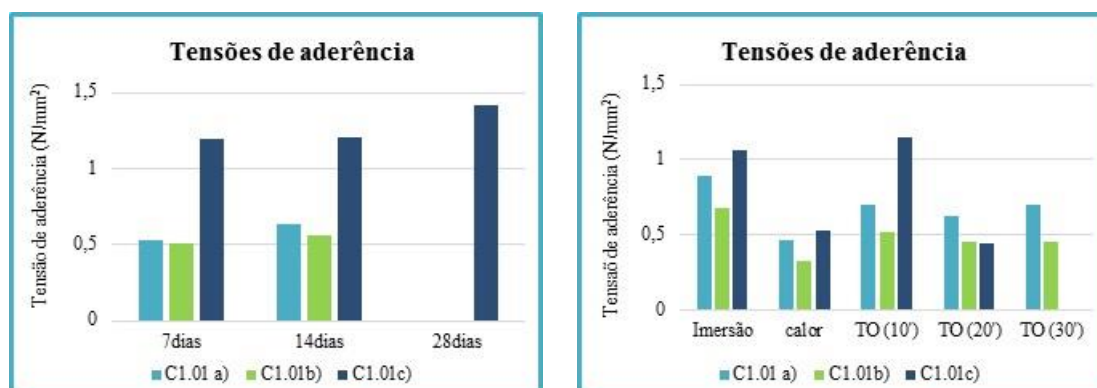


Figura 36 - Tensões de aderência para as várias condições em estudo

Pela análise dos resultados obtidos nos ensaios de tração perpendicular, pode concluir-se que a hipótese C1.01 c) é a que apresenta melhores resultados para as condições iniciais (7, 14 e 28 dias) e em imersão. Não apresenta porém, um bom comportamento às condições de calor nem em tempo aberto a partir dos 10 minutos.

Para **C1.01 a) e b)** as roturas para as condições iniciais (7 e 14 dias), imersão, calor e tempo aberto são maioritariamente coesivas pela cola (CF-A).

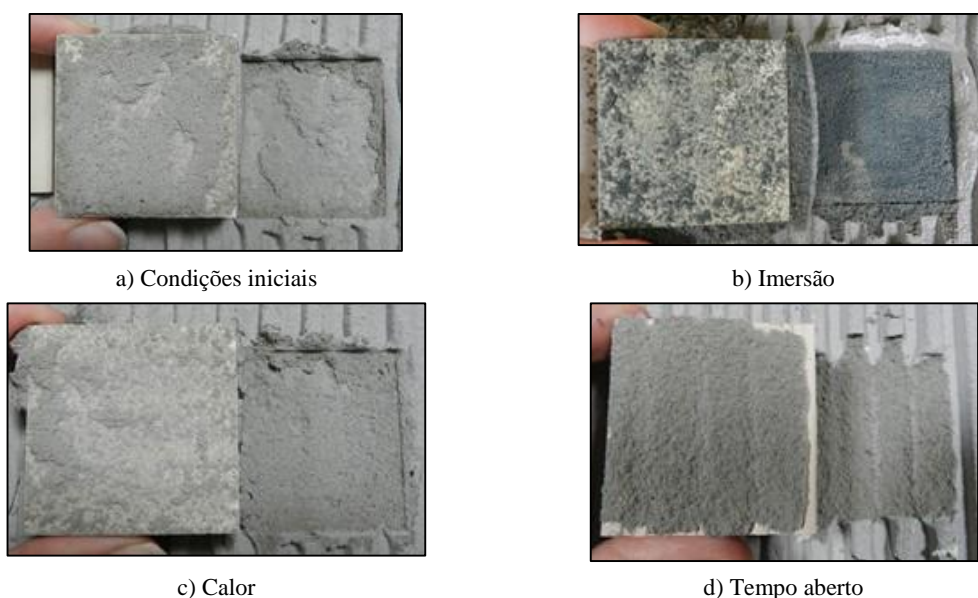


Figura 37 – Roturas C1.01 a) e b)

Para **C1.01 c)** as roturas são adesivas entre o cerâmico e a cola (AF-T), para as condições de imersão, calor e tempo aberto. Em condições iniciais (7 e 14 dias) as roturas são coesivas pela cola (CF-A).

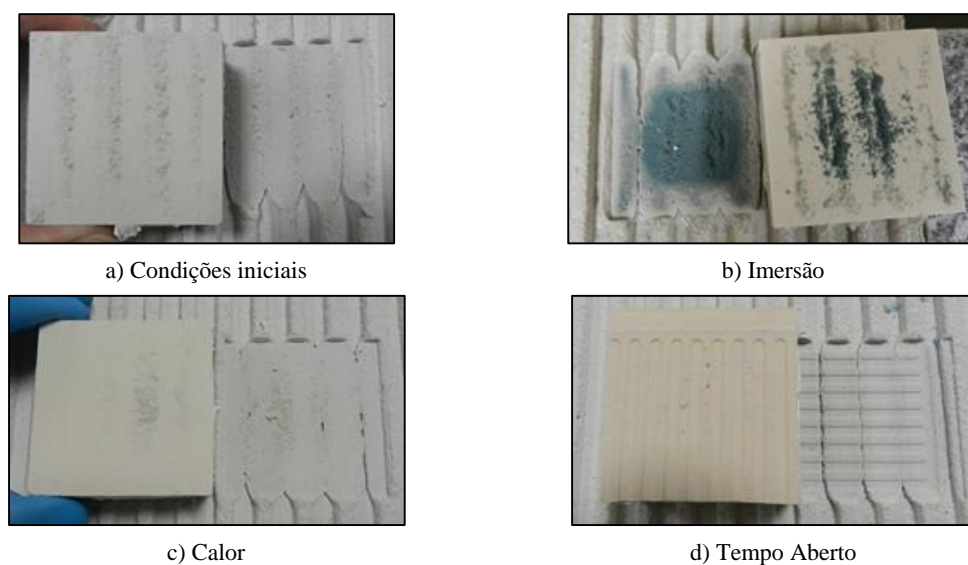


Figura 38 – Roturas C1.01 c)

6.3.2. Formulações do tipo C2

Na tabela 18 apresentam-se as percentagens em massa de cada componente utilizado no desenvolvimento das formulações.

Tabela 18 - Formulações com diferentes percentagens de cimento e introdução de escória de alto -forno

	Hipóteses				
	C2S.00	C2S.01	C2S.02	C2S.03	C2S.04
Escória E	40.00%	40.00%	40.00%	40.00%	40.00%
Escória EP	10.00%	10.00%	10.00%	10.00%	10.00%
Areia siliciosa	38.70%	38.60%	38.60%	38.60%	37.60%
Supracem 45 (OPC + reativo)	4.50%	4.50%	4.50%	4.50%	4.50%
Polímero redispersável	3.50%	3.50%	3.50%	3.50%	3.50%
Gesso Hemi - hidratado	3.00%	3.00%	3.00%	3.00%	3.00%
Éter de celulose	0.30%	0.30%	0.30%	0.30%	0.30%
Fibras (Binder 6mm)	-	0.10%	-	-	-
Ácido cítrico	-	-	0.10%	-	-
Gluconato de sódio	-	-	-	0.10%	0.10%
Silicato de sódio	-	-	-	-	1.00%

As formulações desenvolvidas foram caracterizadas como produto em pasta. Esta caracterização consistiu na determinação da percentagem de água do amassado, da massa volúmica aparente, do tempo de presa e capacidade de poder molhante e transferência conforme os métodos de ensaio descritos anteriormente. Os resultados obtidos apresentam-se na tabela 19.

Pelos resultados apresentados, nota-se que o tempo de presa é substancialmente elevado para todos os casos, o que poderá constituir uma dificuldade durante aplicações reais em obra.

Também se observa poder molhante e transferência curtas, indicando potenciais problemas ao nível do tempo aberto. Esta questão só melhora para as formulações C2S.02 e C2S.04 mas, ainda assim, com limitações quando se compara com produtos atuais.

Todas as formulações avaliadas tendem a apresentar um odor típico dos sulfatos (similar a “podre”), uma vez que não se utiliza a “mascara” de odor.

Tabela 19 - Resultados dos produtos em pasta de argamassas com diferentes percentagens de escória de alto - forno

		Hipóteses				
		C2S.00	C2S.01	C2S.02	C2S.03	C2S.04
% Água		26.0%	28.0%	26.5%	26.5%	26.5%
ρ_{Pasta}		1.46	1.46	1.46	1.46	1.43
Tempo de presa	Início	17h	>18h	>24h	>22h	>20h
	Fim	21h				
Poder Molhante	5'	90%	95%	100%	95%	95%
	10'	75%	80%	100%	95%	85%
	20'	50%	50%	90%	85%	75%
	30'	-	-	70%	80%	65%
Transferência	5'	75%	95%	100%	95%	95%
	10'	5%	60%	100%	90%	85%
	20'	0%	50%	85%	85%	70%
	30'	-	-	60%	80%	20%

Na figura 39 são apresentados os gráficos das tensões de aderência. Pelas análises dos mesmos, verifica-se que a versão C2S.02 é a que apresenta valores superiores para todas as condições. Ao invés, a versão C2S.01 apresenta resultados tendencialmente menores e muito abaixo do valor limite de 1N/mm^2 exigido pela norma. Como sumário, os resultados apontam para formulações com potencial de melhoria, mas capazes de assegurar a possibilidade de desenvolvimento de argamassas – cola com concentrações de cimento Portland muito baixas.

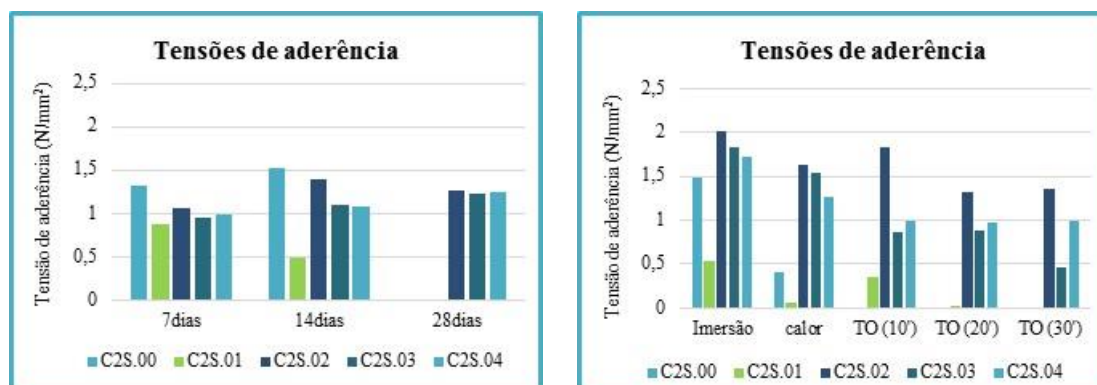


Figura 39 - Tensões de aderência para as várias condições em estudo

A hipótese C2S.00 apresenta roturas adesivas entre o cerâmico e a cola (AF-T) em todas as condições a que foi exposta. A hipótese C2S.01 apresenta roturas adesivas entre

o cerâmico e a cola (AF-T) para as condições iniciais (7 e 14 dias), para as condições de exposição ao calor e imersão. As hipóteses C2S.02, C2S.03 e C2S.04 apresentam roturas coesivas pela cola (CF-A) para condições iniciais (7, 14 e 28 dias), para condições de exposição ao calor e imersão. Para as condições de tempo aberto as hipóteses C2S.02 e C2S.03 apresentam roturas coesivas pela cola até aos 20 minutos e adesivas entre o cerâmico e a cola aos 30 minutos. Nas mesmas condições na hipótese C2S.04 a rotura é adesiva entre o cerâmico e a cola ao longo de todo o tempo de ensaio.

Considerando que os resultados ainda estão aquém do pretendido, com especial atenção ao tempo de presa, ainda não realizaram ensaios de deformação transversal.

7. Conclusões e Propostas de trabalhos futuros

Comprovou-se neste trabalho que as escórias de alto-forno são substâncias essencialmente amorfas, potencialmente reativas e podem ser utilizadas como ligante em conjunto com o cimento.

Pela análise das características físicas e químicas que se efetuaram aos dois tipos de escória em estudo, comprovou-se pelo método de BET que a área superficial específica das escórias é inferior à do cimento Portland. Estes resultados significam que as escórias apresentam partículas mais grossas e por consequência menos reativas que o cimento. Pela medição da distribuição do tamanho da partícula concluímos que a escória EP é mais fina que a escória E, sendo o diâmetro médio de EP 6.34 μ m e de E 14 μ m. Este resultado vai de encontro aos resultados obtidos por BET, pois E apresenta uma área de superfície específica inferior a EP, e uma maior área específica revela partículas mais finas.

Nos ensaios de reatividade pozolânica conclui-se que, relacionando os resultados dos ensaios à flexão e à compressão, estes são equivalentes segundo a metodologia apresentada, com ou sem base forte. Não se consegue porém assegurar a distinção entre as duas escórias apresentadas, conforme seria esperado pelos resultados obtidos relativamente à área superficial e ao grau de finura. No entanto, a metodologia confirma o potencial reativo para as duas escórias em estudo, pelo que ambas serão introduzidas na formulação de argamassa-cola.

Na avaliação do impacto na substituição parcial de cimento Portland por escória de alto - forno, em argamassa - cola do tipo C1, pode-se concluir que, comparando os resultados das argamassas com substituição, CCPE.x e CCPEP.x, com a argamassa base CPP.00, houve uma otimização dos resultados pois em todas as condições de cura, exceto tempo aberto, os resultados das argamassas com substituição foram superiores aos da argamassa base. É notório, à medida que se aumenta percentagem da escória, que a mistura sofre alteração de cor e intensificação do odor. Os valores de tensão de aderência obtidos encontram-se acima do exigido pela EN 12004, o que reflete argamassa com potencial de desenvolvimento.

Na avaliação do impacto na substituição parcial de cimento Portland por escória de alto - forno, em argamassa do tipo C2, as deduções foram diferentes. Embora não tenha havido variações significativas, nas densidades em pó e pasta, entre as hipóteses com substituição e a hipótese padrão, ao nível da presa, poder molhante e transferência a introdução de escória prejudicou os resultados. Para solucionar o problema recorreu-se a uma revisão da formulação diminuindo a percentagem de éter de celulose. A diminuição funcionou levando a valores aceitáveis o tempo de presa, poder molhante e transferência. Também nestas hipóteses se verificou, a alteração da cor e do odor, do produto endurecido quando imerso. Em relação ao odor, este foi possível disfarçar, acrescentando às misturas uma “máscara” de odor e concluímos que pode ser utilizado sem provocar alterações em nenhum dos parâmetros, revelando-se bastante eficaz. Relativamente à alteração da cor, embora se tenha testado a introdução do sulfato de cobre, não foi possível solucionar esse problema. Identicamente às argamassas - cola do tipo C1, os valores de tensão de aderência obtidos encontram-se acima do exigido pela EN 12004, o que reflete argamassa com potencial de desenvolvimento.

Nas formulações em que a escória de alto – forno é o ligante principal verificou-se, para as hipóteses de classe C1, dificuldades ao nível da presa, condições de calor e tempo aberto. Ainda assim a hipótese C1.01 c) é a que apresenta resultados acima dos exigidos pela EN 12004 para as condições iniciais e imersão.

Observou-se, nas hipóteses de classe C2, que o tempo de presa é substancialmente elevado para todos os casos, o que poderá constituir uma dificuldade durante aplicações reais em obra. As hipóteses C2S.02, C2S.03 e C2S.04 apresentaram valores de tensão de aderência acima do exigido pela EN 12004, indicando o potencial de desenvolvimento.

Propostas de trabalhos futuros

Como proposta de trabalhos futuros, poder-se-ia executar a reformulação da argamassa C1.01 c), por forma a melhorar algumas propriedades e alguns valores de aderência, que neste estudo não cumpriram os requisitos da EN 12004, nomeadamente, a correção do tempo de presa, tempo aberto e resistência em condições de calor. Reformular similarmente C2S.02 e C2S.04, por forma a melhorar os valores elevados de tempo de presa.

Também se recomenda o estudo mais pormenorizado da interpretação dos resultados obtidos em função das tipologias de formulação adotadas.

Com efeito, uma análise complementar dos cristais formados durante as reações poderá ajudar a definir as metodologias mais eficientes para a melhoria dos tempos de presa e das aderências em condições críticas.

8. Referências Bibliográficas

AECOPS (2009). O Mercado da Reabilitação: Enquadramento, Relevância e Perspetivas.

Afonso, F.P. (2001). Resultados Definitivos: Potencialidade do mercado de reparação e manutenção face às características do parque edificado. Seminário Censos LNEC.

Allen, T. (1996). Particle size Measurement – Volume 2.

Almeida, A., Sichieri, E. (2006). Propriedades microestruturais de argamassas de cimento Portland com adições minerais e poliméricas utilizadas na fixação de porcelanato. Cerâmica 52, Brasil. Pág. 174-179.

Ângulo, S. C., Zordan, S. E., John, V. M. (2000). Desenvolvimento sustentável e a reciclagem de resíduos na construção civil. PCC - Departamento engenharia de construção civil da escola politécnica. EPUSP. São Paulo, Brasil.

Bhanja, S., Sengupta, B. (2005). Influence of silica fume on the tensile strength of concrete. Cement and Concrete Research 35 (2005) 743-747.

Brunauer, S., Emmet, P.H., Teller, E. (1938). Adsorption of gases in multi-molecular layes. J. Am. Chem. Soc. 60. 309-319

Cahiers du CSTB (2669 - 4). Modalités d'essais-A1.1. Massa volumique aparente

Coelho, A., Torgal, F. P., Jalali, S. (2009). A cal na Construção. Edição Tecminho ISBN 978-972-99179-8-1, Guimarães.

Coutinho, A. S. (1997). Fabrico e propriedades do betão. Volume 1 - Propriedades das matérias-primas, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.

EN 1015-11: 2006. Methods of test for mortar for Masonry – Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar.

EN 1015-12:2006. Methods of test for mortar for masonry-Part 12: Determination of adhesive strength of hardened rendering and plastering mortars on substrates.

EN 1015-6:1998/A1:2006. Methods of test for mortar for masonry – Part 6: Determination of bulk density of fresh mortar.

EN 12004. CEN (2007). Adhesives for tiles – Requirements, evaluation of conformity, classification and designation. Committee European de Normalization.

EN 1347. Adhesives for tiles. Determination of wetting capability.

EN 1348. Adhesives for tiles. Determination of tensile adhesion strength for cimentitious adhesives.

EN 998-2:2013. Especificação de argamassas para alvenarias. Parte 2: Argamassas de assentamento.

EN NO 196-3. Métodos de ensaios de cimentos. Determinação do tempo de presa e expansibilidade.

EN WI67072. Liquid waterproofing membrane.

EN1308:2007. Adhesives for tiles-Determination of slip.

Faria, J. F. D., Torgal, F. P., Jalali, S. (2011). Desenvolvimento de argamassas para a reabilitação de edifícios antigos. Parte 1 - Trabalhabilidade e comportamento mecânico. Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil 4800 Guimarães, Portugal.

Faria, P. (2004). Argamassas de revestimento para alvenarias antigas. FCT – UNL, Lisboa

Gartner, E. (2004). Industrially interesting approaches to “low-CO₂” cements. Lafarge Laboratoire Central de Recherche, 95 Rue du Montmurier, St. Quentin Fallavier 38291, France.

Guía Técnica UEAtc para la evaluación de colas para revestimientos cerámicos; Diciembre 1990.

ISO 13320:2009. Particle size analysis - Laser diffraction methods.

JOHN, V. M. (2000). Reciclagem de resíduos na construção civil – Contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento. São Paulo. 102p. Tese (livre docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

John, V. M. J. (1999). Panorama sobre a reciclagem de resíduos na construção civil. In: Seminário desenvolvimento sustentável e a reciclagem na construção civil, 2., São Paulo. Anais. São Paulo, IBRACON. P.44-55.

Lopes, A. B. (2008). Caracterização de Pós. Apontamentos da disciplina de Caracterização de Materiais, Universidade de Aveiro.

Magalhães, A. C., Veiga, M. R. (2005). Estudo comparativo de possíveis soluções de argamassas para revestimentos de paredes de edifícios antigos. 1º Congresso Nacional de Argamassas de Construção, Lisboa.

Margalha, M. G. (2011). Argamassas. Documento de apoio às aulas de Conservação e recuperação do Património. Universidade de Évora. Engenharia Civil.

Marques, S. M. F. (2005). Estudo de argamassas de reabilitação de edifícios antigos. Departamento de Engenharia Cerâmica e do Vidro, Tese de Mestrado, Universidade de Aveiro, Aveiro.

Martins, J. G., Paiva, P. A. (2010). Materiais de Construção I. Universidade Fernando Pessoa, Porto.

Mateus, R. (2004). Novas tecnologias construtivas com vista à sustentabilidade da construção. Tese de Mestrado Universidade do Minho. Guimarães.

Mikhail, R. Sh., Kelim, S. A. (1966). Adsorption of organic vapors in relation to pore structure of hardened Portland cement pastes. Highw. Res. Board 90 123 – 134 special report.

Mora, E. (2007). Life cycle, sustainability and the transcendent quality of building materials. Building and Environment Vol. 42, 2007, pp.1329-1334.

Neville, A. M. (1997). Propriedades do Concreto. 2ª Ed., Editora Pini, S. Paulo, SP.

NP EN 1015-1. Methods of test for mortar for masonry – Part1: Determination of particle size distribution

NP EN 1348. Colas para ladrilhos Determinação da resistência á tração de cimentos cola.

NP EN 196 – 1. Métodos de ensaio de cimentos Parte 1 Determinação das resistências mecânicas.

NS EN 933-1 (2012). Tests for geometrical properties of aggregates Part 1 : Determination of particle size distribution Sieving methos

Odler, I. (2003). The BET-specific surface area of hydrated Portland cement and related materials. Institute of non-metallic Materials, Technical University Clausthal, 38678 Clausthal – Zellerfeld, Germany. Cement and concret research.

Oliveira, S. (2008). Desenvolvimento de métodos expeditos de caracterização de argamassas de construção de um fabricante do mercado português. Dissertação de Mestrado, Universidade de Aveiro.

Oliveira, S. et al. (2007). Comportamento de argamassas e elementos de alvenaria antiga sujeitos à ação de sais. APFAC: 2º Congresso Português de Argamassas de Construção.

Paiva, H. et al. (2007). Efeito da natureza do ligante no comportamento em fresco de uma argamassa de reabilitação. APFAC: 2º Congresso Português de Argamassas de Construção.

Paiva, H. (2005). “Caracterização reológica de argamassas”, Dissertação de Mestrado, Universidade de Aveiro.

PINTO, T.P. (1999). Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana. São Paulo. 189p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

Pontes, J., Silva, A. S., Faria, P. (2012). Contributos para a melhoria da durabilidade e sustentabilidade de argamassas e betões - avaliação da reatividade de pozolanas artificiais. 4º Congresso Construção. Coimbra, Portugal.

Portland Cement Association “Chapter 3 Fly ash, Slag, Silica Fume and Natural Pozzolans” The University of Memphis.

Price, L., Worrell, E., Phylipsen, D. (1999). Energy use and carbon dioxide emissions in energy-intensive industries in key developing countries. Proceedings of the 1999 Earth Technologies Forum, Washington, DC, Sept. 27– 29.

Rezende, F. (Julho, 2004). Obtenção de cimento Portland, quimicamente modificado, utilizando-se lama de aciaria com baixo teor de ferro metálico. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação da Rede Temática em Engenharia de

Materiais - REDEMAT, do convênio entre a Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP, o Centro Tecnológico de Minas Gerais - CETEC e a Universidade do Estado de Minas Gerais – UEMG, como parte integrante dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Rocca, A. C. C. et al. (1993). Resíduos sólidos industriais, 2a ed., Cetesb, São Paulo.

Rocha, G. (2005). Caracterização Microestrutural do metacaulim de alta reatividade. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Curso de Pós – graduação em engenharia metalúrgica e de minas.

Shi, C. (2004). Steel Slag - Its Production, Processing, Characteristics, and Cimentitious Properties. 236 / JOURNAL OF MATERIALS IN CIVIL ENGINEERING © ASCE / MAY/JUNE 2004

Shi, C., Day, R. L. (2000). Pozzolanic reaction in the presence of chemical activators - Part I. Reaction kinetics. Cement & Concrete Research. Vol. 30: Pg. 51-58.

Shi, C., Day, R. L. (2001). Comparison of different methods for enhancing reactivity of pozzolans. Cement & Concrete Research. Vol. 31: Pg. 813-818.

Shi, C., Qian, J. (2000). High performance cementing materials from industrial slags - a review. CJS Technology Inc., 2116 Upland Drive, Burlington, Ont., L7M 2Z2 Canada and Department of Materials Science and Engineering, Chongqing Jianzhu University, 400045 Chongqing, PR China.

Torgal, F. P.; Jalali, S. (2007). Construção sustentável. O caso dos materiais de construção. Instituto Politécnico de Castelo Branco, Universidade do Minho. Congresso Construção 2007 - 3.º Congresso Nacional 17 a 19 de Dezembro, Coimbra, Portugal.

Torgal, F. P.; Jalali, S. (2010). Contextualização da problemática relativa à utilização de argamassas bastardas em obras de reabilitação. Revista Internacional Construlink - Estruturas e Construções.

Vasconcelos, M. C. (2008). Caulino. Das origens às aplicações. Perspetivas para o século XXI. Departamento de Geociências. Tese de Mestrado, Universidade de Aveiro, Aveiro.

Veiga, M. (2005). Comportamento de rebocos para edifícios antigos: exigências gerais e requisitos específicos para edifícios antigos. Comunicação ao Seminário “Sais solúveis em argamassas de edifícios antigos. Danos, processos e soluções”. Lisboa: LNEC, Fevereiro de 2005.

Veiga, M. (2012). Argamassas de conservação como elementos multifuncionais e dinâmicos. O caso das argamassas para conservação de revestimentos azulejados. Congresso Internacional Azulejar. Ovar, Aveiro.

Veiga, M. et al. (2004). Conservação e renovação de revestimentos de paredes de edifícios antigos. Lisboa: LNEC, Julho de 2004. Coleção Edifícios, CED 9.

Veiga, M., Carvalho, F. (2002). Argamassas de reboco para edifícios antigos. Requisitos e características a respeitar. Lisboa: LNEC, Outubro de 2002. Cadernos de Edifícios, nº 2.

Vieira, J. (2012). Funcionalização de argamassas para controlo das condições ambiente. Departamento de Engenharia de Materiais e Cerâmica, Tese de Mestrado, Universidade de Aveiro, 2012.

Wang, Q., Yan, P., Mi, G. (2012). Effect of blended steel slag - GGBFS mineral admixture on hydration and strength of cement. Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China.

Xuequan, W.; Hong, Z., Xinkai, H.; Husen, L. (1999). Study on steel slag and fly ash composite Portland cement. Cement (AECOPS, 2009) and Concrete Research 29 (1999) 1103–1106

- **Ensaio de reatividade**

Tabela 20 - Resultados de resistência à flexão e compressão sem base forte para diferentes condições de cura

Escória E																			
Tempo (dias)	Provestes secos			Tempo (dias)	Provetes Imersos			Tempo (dias)	Provetes secos					Provetes Imersos					
	m (g)	Res Flex. (N/mm ²)	Res Comp. (N/mm ²)		m (g)	Res Flex. (N/mm ²)	Res Comp. (N/mm ²)		P I	P II	P III	P IV	P V	P VI	P VII	P VIII			
	24horas	444,16	0,52		1,42	24horas	-		-	-	24horas	444,16	445,60	496,03	487,26	488,92	500,72	497,06	491,44
	3dias	426,12	0,98		2,94	3dias	516,84		1,74	5,95	3dias	-	426,12	474,65	471,08	468,61	516,84	512,00	510,54
	7dias	463,29	1,04		8,35	7dias	512,54		3,29	9,28	7dias	-	-	463,29	460,99	458,33	-	512,54	511,07
	28dias	448,85	2,72		11,9	28dias	512,38		5,63	15,38	28dias	-	-	-	448,85	448,05	-	-	512,38
Escória EP																			
Tempo (dias)	Provetes secos			Tempo (dias)	Provetes imersos			Tempo (dias)	Provetes secos					Provetes imersos					
	m (g)	Res Flex. (N/mm ²)	Res Comp. (N/mm ²)		m (g)	Res Flex. (N/mm ²)	Res Comp. (N/mm ²)		P I	P II	P III	P IV	P V	P VI	P VII	P VIII			
	24horas	429,59	0,84		2,17	24horas	-		-	-	24horas	429,59	478,18	472,63	479,58	420,59	475,73	475,29	482,30
	3dias	459,76	1,17		6,59	3dias	495,45		2,46	8,21	3dias	-	459,76	462,18	469,52	411,38	495,45	496,01	501,82
	7dias	454,56	0,95		10,29	7dias	496,84		1,76	11,75	7dias	-	-	454,56	463,36	405,4	-	496,84	502,42
	28dias	447,89	1,06		12,95	28dias	503,45		1,85	15,68	28dias	-	-	-	447,89	393,55	-	-	503,45

Tabela 21 - Resultados de resistência à flexão e compressão com base forte para diferentes condições de cura

Escória E + Ativador																																																																																																					
<table><tr><th rowspan="2">Tempo (dias)</th><th colspan="3">Provetes secos</th></tr><tr><th>m (g)</th><th>Res Flex. (N/mm²)</th><th>Res Comp. (N/mm²)</th></tr><tr><td>24horas</td><td>434,46</td><td>0,76</td><td>2,04</td></tr><tr><td>3dias</td><td>477,27</td><td>1,05</td><td>6,60</td></tr><tr><td>7dias</td><td>467,41</td><td>0,96</td><td>8,78</td></tr><tr><td>28dias</td><td>451,54</td><td>1,28</td><td>11,61</td></tr></table>	Tempo (dias)	Provetes secos			m (g)	Res Flex. (N/mm ²)	Res Comp. (N/mm ²)	24horas	434,46	0,76	2,04	3dias	477,27	1,05	6,60	7dias	467,41	0,96	8,78	28dias	451,54	1,28	11,61	<table><tr><th rowspan="2">Tempo (dias)</th><th colspan="3">Provetes imersos</th></tr><tr><th>m (g)</th><th>Res Flex. (N/mm²)</th><th>Res Comp. (N/mm²)</th></tr><tr><td>24horas</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td></tr><tr><td>3dias</td><td>502,35</td><td>1,85</td><td>6,67</td></tr><tr><td>7dias</td><td>505,93</td><td>3,12</td><td>9,78</td></tr><tr><td>28dias</td><td>511,79</td><td>4,72</td><td>14,06</td></tr></table>	Tempo (dias)	Provetes imersos			m (g)	Res Flex. (N/mm ²)	Res Comp. (N/mm ²)	24horas	-	-	-	3dias	502,35	1,85	6,67	7dias	505,93	3,12	9,78	28dias	511,79	4,72	14,06	<table><tr><th rowspan="2">Tempo (dias)</th><th colspan="5">Provetes secos</th><th colspan="3">Provetes imersos</th></tr><tr><th>P I</th><th>P II</th><th>P III</th><th>P IV</th><th>P V</th><th>P VI</th><th>P VII</th><th>P VIII</th></tr><tr><td>24horas</td><td>434,46</td><td>485,93</td><td>486,38</td><td>483,21</td><td>433,59</td><td>480,69</td><td>483,61</td><td>486,42</td></tr><tr><td>3dias</td><td>-</td><td>477,27</td><td>475,88</td><td>473,61</td><td>421,24</td><td>502,35</td><td>505,68</td><td>510,42</td></tr><tr><td>7dias</td><td>-</td><td>-</td><td>467,41</td><td>466,03</td><td>414,58</td><td>-</td><td>505,93</td><td>510,77</td></tr><tr><td>28dias</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>451,54</td><td>403,93</td><td>-</td><td>-</td><td>511,79</td></tr></table>	Tempo (dias)	Provetes secos					Provetes imersos			P I	P II	P III	P IV	P V	P VI	P VII	P VIII	24horas	434,46	485,93	486,38	483,21	433,59	480,69	483,61	486,42	3dias	-	477,27	475,88	473,61	421,24	502,35	505,68	510,42	7dias	-	-	467,41	466,03	414,58	-	505,93	510,77	28dias	-	-	-	451,54	403,93	-	-	511,79
		Tempo (dias)	Provetes secos																																																																																																		
	m (g)		Res Flex. (N/mm ²)	Res Comp. (N/mm ²)																																																																																																	
	24horas	434,46	0,76	2,04																																																																																																	
	3dias	477,27	1,05	6,60																																																																																																	
	7dias	467,41	0,96	8,78																																																																																																	
28dias	451,54	1,28	11,61																																																																																																		
Tempo (dias)	Provetes imersos																																																																																																				
	m (g)	Res Flex. (N/mm ²)	Res Comp. (N/mm ²)																																																																																																		
24horas	-	-	-																																																																																																		
3dias	502,35	1,85	6,67																																																																																																		
7dias	505,93	3,12	9,78																																																																																																		
28dias	511,79	4,72	14,06																																																																																																		
Tempo (dias)	Provetes secos					Provetes imersos																																																																																															
	P I	P II	P III	P IV	P V	P VI	P VII	P VIII																																																																																													
24horas	434,46	485,93	486,38	483,21	433,59	480,69	483,61	486,42																																																																																													
3dias	-	477,27	475,88	473,61	421,24	502,35	505,68	510,42																																																																																													
7dias	-	-	467,41	466,03	414,58	-	505,93	510,77																																																																																													
28dias	-	-	-	451,54	403,93	-	-	511,79																																																																																													

Escória EP + Ativador																																																																																																					
<table><tr><th rowspan="2">Tempo (dias)</th><th colspan="3">Provetes secos</th></tr><tr><th>m (g)</th><th>Res Flex. (N/mm²)</th><th>Res Comp. (N/mm²)</th></tr><tr><td>24horas</td><td>405,93</td><td>0,73</td><td>1,57</td></tr><tr><td>3dias</td><td>454,27</td><td>0,95</td><td>7,34</td></tr><tr><td>7dias</td><td>447,52</td><td>1,2</td><td>9,85</td></tr><tr><td>28dias</td><td>427,81</td><td>0,94</td><td>10,39</td></tr></table>	Tempo (dias)	Provetes secos			m (g)	Res Flex. (N/mm ²)	Res Comp. (N/mm ²)	24horas	405,93	0,73	1,57	3dias	454,27	0,95	7,34	7dias	447,52	1,2	9,85	28dias	427,81	0,94	10,39	<table><tr><th rowspan="2">Tempo (dias)</th><th colspan="3">Provetes imersos</th></tr><tr><th>m (g)</th><th>Res Flex. (N/mm²)</th><th>Res Comp. (N/mm²)</th></tr><tr><td>24horas</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td></tr><tr><td>3dias</td><td>498,03</td><td>1,88</td><td>6,76</td></tr><tr><td>7dias</td><td>501,17</td><td>2,06</td><td>9,98</td></tr><tr><td>28dias</td><td>500,82</td><td>4,21</td><td>15,85</td></tr></table>	Tempo (dias)	Provetes imersos			m (g)	Res Flex. (N/mm ²)	Res Comp. (N/mm ²)	24horas	-	-	-	3dias	498,03	1,88	6,76	7dias	501,17	2,06	9,98	28dias	500,82	4,21	15,85	<table><tr><th rowspan="2">Tempo (dias)</th><th colspan="5">Provetes secos</th><th colspan="3">Provetes imersos</th></tr><tr><th>P I</th><th>P II</th><th>P III</th><th>P IV</th><th>P V</th><th>P VI</th><th>P VII</th><th>P VIII</th></tr><tr><td>24horas</td><td>405,93</td><td>465,96</td><td>466,15</td><td>465,37</td><td>438,7</td><td>479,81</td><td>479,97</td><td>477,87</td></tr><tr><td>3dias</td><td>-</td><td>454,27</td><td>455,95</td><td>452,07</td><td>428,91</td><td>498,03</td><td>500,24</td><td>498,87</td></tr><tr><td>7dias</td><td>-</td><td>-</td><td>447,52</td><td>442,72</td><td>420,42</td><td>-</td><td>501,17</td><td>500,06</td></tr><tr><td>28dias</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>427,81</td><td>404,79</td><td>-</td><td>-</td><td>500,82</td></tr></table>	Tempo (dias)	Provetes secos					Provetes imersos			P I	P II	P III	P IV	P V	P VI	P VII	P VIII	24horas	405,93	465,96	466,15	465,37	438,7	479,81	479,97	477,87	3dias	-	454,27	455,95	452,07	428,91	498,03	500,24	498,87	7dias	-	-	447,52	442,72	420,42	-	501,17	500,06	28dias	-	-	-	427,81	404,79	-	-	500,82
		Tempo (dias)	Provetes secos																																																																																																		
	m (g)		Res Flex. (N/mm ²)	Res Comp. (N/mm ²)																																																																																																	
	24horas	405,93	0,73	1,57																																																																																																	
	3dias	454,27	0,95	7,34																																																																																																	
	7dias	447,52	1,2	9,85																																																																																																	
28dias	427,81	0,94	10,39																																																																																																		
Tempo (dias)	Provetes imersos																																																																																																				
	m (g)	Res Flex. (N/mm ²)	Res Comp. (N/mm ²)																																																																																																		
24horas	-	-	-																																																																																																		
3dias	498,03	1,88	6,76																																																																																																		
7dias	501,17	2,06	9,98																																																																																																		
28dias	500,82	4,21	15,85																																																																																																		
Tempo (dias)	Provetes secos					Provetes imersos																																																																																															
	P I	P II	P III	P IV	P V	P VI	P VII	P VIII																																																																																													
24horas	405,93	465,96	466,15	465,37	438,7	479,81	479,97	477,87																																																																																													
3dias	-	454,27	455,95	452,07	428,91	498,03	500,24	498,87																																																																																													
7dias	-	-	447,52	442,72	420,42	-	501,17	500,06																																																																																													
28dias	-	-	-	427,81	404,79	-	-	500,82																																																																																													

Avaliação do impacto na substituição parcial de cimento Portland por escória de alto-forno

- Substituição em cimento-cola do tipo C1

Tabela 22 - Formulações com diferentes percentagens de cimento e introdução de escória de alto -forno

		Hipóteses						
		Padrão	CCPE.01	CCPEP.01	CCPE.02	CCPEP.02	CCPE.03	CCPEP.03
Componentes	Cim. cz CEM II 42,5 (OPC)	35,00	31,50	31,50	26,50	26,50	17,50	17,50
	Escória de alto forno E/EP	0,00	3,50	3,50	8,50	8,50	17,50	17,50
	Areia siliciosa	52,87	52,87	52,87	52,87	52,87	52,87	52,87
	Filler	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
	Polímero redispersável	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30
	Éter de celulose	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30
	Éter de amido	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
	Regulador de tempo de presa	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50

CCPE – com Escória de alto - forno E e CCPEP – com escória de alto-forno EP

Tabela 23 - Resultados dos produtos em pasta de argamassas com diferentes percentagens de cimento e introdução de escória de alto - forno

RESULTADOS DAS HIPÓTESES CCP															
		CCP.00		CCPE.01		CCPEP.01		CCPE.02		CCPEP.02		CCPE.03		CCPEP.03	
% água		24		23		23		23,5		23		23		23	
ppó		1,24		1,26		1,26		1,25		1,21		1,26		1,18	
ppasta		1,52		1,46		1,61		1,63		1,63		1,58		1,61	
Deslizamento	20 kg/m2	1 mm		1 mm		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00	
	30 kg/m2	2 mm		2 mm		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00	
tempo de presa	início	6,30H		6,30H		8,00H		6,30H		6H		7,45H		8H	
	fim	8H		7,30H		9,00H		8,15H		8,15H		9,45H		8,30H	
Poder Molhante	20'	90%		90%		100%		85%		95%		95%		95%	
	30'	90%		90%		100%		90%		85%		90%		95%	
Transferência	20'	85%		70%		95%		50%		85%		85%		85%	
	30'	80%		10%		95%		30%		20%		30%		70%	
Retenção de água	P _{inicial}	641,80	98,95	649,50	98,85	648,80	99,01	650,20	98,79	672,60	99,92	655,00	99,27	659,90	99,51
	P _{final}	1,30		1,40		1,20		1,50		0,10		0,90		0,60	

Tabela 24 - Tensões de aderência para as várias condições em avaliação

Aderências	7dias	grés	1,30	20% CFA	1,52	60% CFA;40% AFT	1,45	60% CFA;40% AFT	1,43	20% CF A	1,44	15% CF A	1,19	15% CF A	1,56	15% CF A
	14dias	grés	1,21		1,43	75% AFT/ 25% CFA	1,54	75% AFT/ 25% CFA	1,63	20% CF A	1,86	15% CF A	1,37	15% CF A	1,54	15% CF A
	28dias	grés	1,15	10% CFA	1,23	10% CFA	1,62	15% CFA	1,71	90% CF A	1,66	90% CFA	1,10	15% CF A	1,50	15% CF A
	Imersão	grés	0,86	40% CFA	0,83	60% CFA	1,13	60% CFA	0,91	80% CFA	1,07	70% CFA	0,96	80% CFA	0,98	70% CFA
	Calor	grés	0,63		1,30	90% CFA	1,41	90% CFA	1,40	75% CFA	1,64	80% CFA	0,98	60% CFA	1,46	60% CFA
	TO (30')	azulejo	0,46	ZERO	0,29	ZERO	1,04	ZERO	0,53	ZERO	0,38	ZERO	0,40	ZERO	0,47	ZERO

- **Substituição em cimento do tipo C2**

Tabela 25 - Formulações com diferentes percentagens de cimento e introdução de escória de alto -forno

		Hipóteses						
		Padrão	CFLE.01	CFLEP.01	CFLE.02	CFLEP.02	CFL.E.03	CFLEP.03
Componentes	Areia siliciosa	34,78	34,78	34,78	34,78	34,78	34,78	34,78
	Areia (0,5 - 1,2 mm)	13,00	13,00	13,00	13,00	13,00	13,00	13,00
	Cimento Cinza Tipo I 42,5	45,00	40,50	40,50	33,75	33,75	22,50	22,50
	Escória de alto - forno (E/EP)	0,00	4,50	4,50	11,25	11,25	22,50	22,50
	Polímero redispersável	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00
	Fibra de Celulose	0,57	0,57	0,57	0,57	0,57	0,57	0,57
	Éter de celulose	0,46	0,40	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46
	Bentonita ASB 60	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30
	Regulador de tempo de presa	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
	Éter de amido	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
	Redutor de crómio	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05

CFLE – com Escória de alto - forno E e CFLEP – com escória de alto-forno EP

Tabela 26 - Resultados dos produtos em pasta de argamassas com diferentes percentagens de cimento e introdução de escória de alto - forno

RESULTADOS DAS HIPÓTESES CFL															
		CFL.00		CFLE.01		CFLEP.01		CFLE.02		CFLEP.02		CFLE.03		CFLEP.03	
% água		29,50		29,00		29,00		28,50		28,50		28,00		28,00	
ρ _{pó}		1,24		1,20		1,18		1,18		1,15		1,19		1,14	
r _{pasta}		1,40		1,36		1,39		1,41		1,41		1,38		1,39	
Deslizamento	20 kg/m2	1 mm		1 mm		1 mm		1 mm		0,00		1 mm		1 mm	
	30 kg/m2	3 mm		2mm		5 mm		2 mm		2 mm		4 mm		2 mm	
Tempo de presa	inicio	7h45		>24h		>24h		Sem resultado		Sem resultado		Sem resultado		Sem resultado	
	fim	11h30													
Poder Molhante	20'	100%		95%		100%		95%		100%		100%		95%	
	30'	100%		100%		100%		90%		95%		95%		85%	
Transferência	20'	100%		90%		100%		85%		95%		100%		95%	
	30'	95%		95%		90%		85%		85%		85%		80%	
Retenção de água	Pinicial	615,90	99,57	605,40	99,78	620,70	99,86	629,70	99,57	624,30	99,49	621,10	99,63	616,70	99,93
	Pfinal	0,60		0,30		0,20		0,60		0,70		0,50		0,10	

Tabela 27 - Tensões de aderência para as várias condições em avaliação

Aderências	7dias	grés	1,60	100% CFA	1,40	100% CFA	1,78	100% CFA	1,43	100% CFA	1,27	100% CFA	Sem resultado	Sem resultado
	14dias	grés	2,10	100% CFA	1,38	100% CFA	1,67	100% CFA	1,66	100% CFA	1,69	100% CFA	Sem resultado	Sem resultado
	28dias	grés	1,92	90% CFA	1,93	90% CFA	1,73	100% CFA	1,81	85% CFA	2,10	95% CFA	Sem resultado	Sem resultado
	Imersão	grés	1,06	80% CFA	0,87	90% CFA	1,56	90% CFA	1,30	80% CFA	1,50	70% CFA	Sem resultado	Sem resultado
	Calor	grés	1,84	95% CFA	1,58	90% CFA	1,98	90% CFA	1,86	90% CFA	2,00	95% CFA	Sem resultado	Sem resultado
	TO (30')	azulejo	1,44	20% CFA	1,32	30% CFA	1,18	40% CFA	1,35	20% CFA	1,38	15% CFA	Sem resultado	Sem resultado

Hipóteses iguais às apresentadas anteriormente com redução de éter de celulose

Tabela 28 - Formulações com diferentes percentagens de cimento e introdução de escória de alto -forno

		Hipóteses						
		Padrão	CFLE.01	CFLEP.01	CFLE.02	CFLEP.02	CFL.E.03	CFLEP.03
Componentes	Areia siliciosa	34,78	34,78	34,78	34,78	34,78	34,78	34,78
	Areia (0,5 - 1,2 mm)	13,00	13,00	13,00	13,00	13,00	13,00	13,00
	Cimento Cinza Tipo I 42,5	45,00	40,50	40,50	33,75	33,75	22,50	22,50
	Escória de alto - forno	0,00	4,50	4,50	11,25	11,25	22,50	22,50
	Polímero redispersável	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00
	Fibra de Celulose	0,57	0,57	0,57	0,57	0,57	0,57	0,57
	Éter de celulose		0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30
	Bentonita ASB 60	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30
	Regulador de tempo	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
	Éter de amido	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
	Redutor de crómio	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
	Sulfato de cobre	-	-	-	-	-	0,20	0,20
	Masquodor	-	-	-	-	-	0,01	0,01

ANEXOS

Tabela 29 - Resultados dos produtos em pasta de argamassas com diferentes percentagens de cimento e introdução de escória de alto - forno

RESULTADOS DAS HIPÓTESES CFL															
		CFL.00		CFLE.01		CFLEP.01		CFLE.02		CFLEP.02		CFLE.03		CFLEP.03	
% água		29,5		25		25		26		26		25		25	
ρ _{pó}		1,24		-		-		-		-		-		-	
r _{pasta}		1,40		1,40		1,47		1,53		1,42		1,51		1,49	
Deslizamento	20 kg/m2	1 mm		0,00								0,00		0,00	
	30 kg/m2	3 mm		0,00								0,00		0,00	
Tempo de presa	Início			9h30		11h15		10h00		9h00		10h45		8h15	
	Fim			12h15		12h30		11h30		10h45		11h00		8h30	
Poder Molhante	20'	100%										95%		90%	
	30'	100%										85%		90%	
Transferência	20'	100%										50% sem calcar		30% sem calcar	
	30'	95%										0% sem calcar		0% sem calcar	
Retenção de água	P _{inicial}	615,90	99,57	619,30	99,03	650,60	99,00	675,40	98,92	628,20	99,00	660,20	99,09	650,00	98,77
	P _{final}	0,60		1,20		1,30		1,50		1,30		1,20		1,60	

Tabela 30 - Tensões de aderência para as várias condições em avaliação

Aderências	7dias	grés	Nota: Para as hipóteses CFL.01 e CFL.02 não se prepararam aderências com 0,3% de éter de celulose	1,74	90% CFA	1,78	80% CFA
	14dias	grés		1,96	100% CFA	1,86	90% CFA
	28dias	grés		2,09	90% CFA	2,02	90% CFA
	calor	grés		2,13	100% CFA	1,94	50% CFA - 50% AFT
	Imersão	grés		1,74	100% CFA	1,23	85% CFA
	TO (30')	azulejo		0,65	50% CFA - 50% AFT	0,58	50% CFA - 50% AFT

Desenvolvimento de formulações com Escória de alto-forno como ligante principal

- **Formulações do tipo C1**

Tabela 31 - Formulações com diferentes percentagens de cimento e introdução de escória de alto -forno

	Hipóteses		
	C1.01 a)	C1.01 b)	C1.01 c)
Cim cz I 42,5 (OPC)	10,0%	10,0%	-
Escória E	10,0%	10,0%	40,0%
Escória EP	-	-	10,0%
Cinzas volantes	5,0%	5,0%	-
Supracem	-	-	4,9%
Gesso Hemi hidratado	-	-	1,0%
Areia siliciosa	73,7%	72,6%	71,3%
Éter de Celulose	0,3%	0,3%	0,3%
Polímero redispersável	1,0%	1,0%	3,5%
Carbonato de lítio	-	0,1%	-
Cimento aluminoso	-	1,0%	-

Tabela 32 - Resultados dos produtos em pasta de argamassas com diferentes percentagens de cimento e introdução de escória de alto - forno

RESULTADOS DAS FORMULAÇÕES C1.01							
		C1.01 a)		C1.01b)		C1.01c)	
% água		21		21		26	
ρ _{pó}		1,40		1,41			
ρ _{pasta}		1,39		1,38		1,43	
Deslizamento	20 kg/m ²	0,00		1,00			
	30 kg/m ²	>30		1,00			
tempo de presa	início	>24h		>24h		>24h	
	fim						
Poder Molhante	5'	-		-		100%	
	10'	-		-		90%	
	20'	90%		90%		70%	
	30'	85%		85%		50%	
Transferência	5'	-		-		100%	
	10'	-		-		90%	
	20'	60%		40%		30%	
	30'	60%		60%		0%	
Retenção de água	P _{inicial}	590,90	98,34	602,20	98,66	636,30	98,78
	P _{final}	1,70		1,40		1,60	

Tabela 33 - Tensões de aderência para as várias condições em avaliação

Aderências	7dias	grés	0,53	100% CFA	0,51	100% CFA	1,20	70% CFA - 30% AFT
	14dias	grés	0,63	100% CFA	0,56	100% CFA	1,21	70% CFA - 30% AFT
	28dias	grés	-	-	-	-	1,42	40% CFA - 60% AFT
	Imersão	grés	0,89	100% CFA	0,68	80% CFA	1,06	30% CFA - 70% AFT
	calor	grés	0,46	80% CFA - 20% AFT	0,32	40% CFA - 60% AFT	0,53	10% CFA - 90% AFT
	TO (10')	azulejo	0,70	90% CFA -	0,52	95% CFA -	1,15	100% AFT
	TO (20')		0,63	90% CFA -	0,45	95% CFA -	0,44	100% AFT
	TO (30')		0,70	80% CFA -	0,46	85% CFA -	0,00	

- **Formulações do tipo C2**

Tabela 34 - Formulações com diferentes percentagens de cimento e introdução de escória de alto -forno

	Hipóteses				
	C2S.00	C2S.01	C2S.02	C2S.03	C2S.04
Escória E	40,0%	40,0%	40,0%	40,0%	40,0%
Escória EP	10,0%	10,0%	10,0%	10,0%	10,0%
Areia Siliciosa	38,7%	38,6%	38,6%	38,6%	37,6%
Supracem 45 (OPC, + reactivo)	4,5%	4,5%	4,5%	4,5%	4,5%
Polímero redispersável	3,5%	3,5%	3,5%	3,5%	3,5%
Gesso Hemi hidratado	3,0%	3,0%	3,0%	3,0%	3,0%
Éter de celulose	0,3%	0,3%	0,3%	0,3%	0,3%
Fibras (Binder 6mm)	-	0,1%	-	-	-
Ácido cítrico	-	-	0,1%	-	-
Gluconato de sódio	-	-	-	0,1%	0,1%
Silicato de sódio	-	-	-	-	1,0%

Tabela 35 - Resultados dos produtos em pasta de argamassas com diferentes percentagens de cimento e introdução de escória de alto - forno

Resultados das Hipóteses C2S											
		C2S.00		C2S.01		C2S.02		C2S.03		C2S.04	
% água		26,0		28,0		26,5		26,5		26,5	
opó											
opasta		1,46		1,46		1,46		1,46		1,43	
Deslizamento	20 kg/m2										
	30 kg/m2										
tempo de presa	início	17h				>24h	21h30				
	fim	21h		18h			22h		20h		
Poder Molhante	5'	90%		95%		100%		95%		95%	
	10'	75%		80%		100%		95%		85%	
	20'	50%		50%		90%		85%		75%	
	30'	-		-		70%		80%		65%	
Transferência	5'	75%		95%		100%		95%		95%	
	10'	5%		60%		100%		90%		85%	
	20'	0%		50%		85%		85%		70%	
	30'	-		-		60%		80%		20%	
Retenção de água	P _{inicial}			669,10	98,98			654,90	99,20	640,40	98,96
	P _{final}			1,50				1,10		1,40	

Tabela 36 - Tensões de aderência para as várias condições em avaliação

Aderências	7dias	grés	1,31	80% AFT - 20% CFA	0,88	50% CFA - 50% AFT	1,06	95% CFA - 5% AFT	0,95	90% CFA - 10% AFT	0,98	95% CFA - 5% AFT
	14dias	grés	1,53		0,48	90% AFT - 10% CFA	1,40	95% CFA - 5% AFT	1,10	95% CFA - 5% AFT	1,07	95% CFA - 5% AFT
	28dias	grés	-				1,26	100% CFA	1,22	100% CFA	1,24	100% CFA
	Imersão	grés	1,48	100% AFT	0,54	10% CFA - 90% AFT	2,02	95% CFA - 5% AFT	1,83	90% CFA - 10% AFT	1,72	90% CFA - 10% AFT
	calor	grés	0,40	5% CFA - 95% AFT	0,06	100% AFT	1,64	95% CFA - 5% AFT	1,54	95% CFA - 5% AFT	1,26	95% CFA - 5% AFT
	TO (10')	azulejo			0,36	100% CFA	1,83	70% CFA -	0,86	70% CFA -	1,00	25% CFA -
	TO (20')				0,02		1,32	70% CFA -	0,89	70% CFA -	0,98	25% CFA -
	TO (30')				0,00		1,36	20% CFA -	0,46	10% CFA -	1,00	10% CFA -